

Virtuální zprovoznění elektrických pohonů s měniči Siemens Sinamics S120

Virtual commissioning of electric drives using Converters Siemens Sinamics S120

Wiktor Kowalczyk

Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Kuchař, Ph.D.

Ostrava, 2021

Abstrakt

Předložená diplomová práce byla realizována ve spolupráci se společností INGETEAM a.s. Zabývá se využitím konceptu digitálního dvojčete v oblasti elektrických pohonů. Samotný koncept digitálního dvojčete byl nejprve stručně popsán a jeho využití zdůvodněno. Následně byly v prostředích WinMOD a MATLAB-Simulink vytvořeny komplexní modely měničů Siemens Sinamics S120 a jejich pracovních mechanismů. Výsledky simulací byly ověřeny pomocí reálných soustrojí.

Klíčová slova

digitální dvojče; virtuální zprovoznění; Simulink; WinMOD; Siemens; Sinamics, Ingeteam a.s.

Abstract

The submitted diploma thesis was realized in cooperation with the INGETEAM Inc. It deals with the use of the concept of digital twins in the field of electric drives. The very concept of the digital twin was first briefly described and its use justified. Subsequently, complex models of Siemens Sinamics S120 inverters and their working mechanisms were created in WinMOD and MATLAB-Simulink environments. The results of the simulations were verified using real machinery sets.

Keywords

digital twin; virtual commissioning; Simulink; WinMOD; Siemens; Sinamics, Ingeteam a.s.

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval své rodině, a především své manželce Dorotě, za motivaci a psychickou podporu po celou dobu magisterského studia.

Velké díky patří společnosti Ingeteam a.s. za poskytnutí všech prostředků potřebných k realizaci této práce. Děkuji konzultantům: Ing. Josefu Klímkovi, z jehož iniciativy tato práce vznikla, Ing. Radimu Langerovi a Ing. Jiřímu Kociánovi, Ph.D. za množství předaných informací, trpělivost a pomoc při řešení četných problémů nastálých během realizace.

Děkuji také doc. Ing. Martinu Kuchařovi za vedení práce na akademické půdě a pomoc zejména s úpravou a strukturováním tohoto dokumentu.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	6
Seznam obrázků	7
Seznam tabulek	11
1 Úvod	12
2 Měniče Siemens SINAMICS S120	13
2.1 Moduly SINAMICS S120	13
2.2 Komunikační sběrnice	14
2.3 Režimy vektorového řízení	15
3 Virtuální zprovoznění	16
3.1 Význam a opodstatnění	16
3.2 Softwarové prostředky	17
4 Předloha pro digitální dvojče měniče SINAMICS	19
4.1 Pohon s měničem G120 v režimu VECTOR	19
4.1.1 Komponenty pracoviště	19
4.1.2 Měření třecí charakteristiky jednomotorového pohonu	22
4.1.3 Měření momentu setrvačnosti jednomotorového pohonu	24
4.2 Pohon Master-Slave s měničem S120 v režimu SERVO	25
4.2.1 Měření třecí charakteristiky Master-Slave pohonu	28
4.2.2 Měření momentu setrvačnosti Master-Slave pohonu	28
5 Tvorba modelů měniče	29
5.1 Koncepce digitálního dvojčete pohonu s měničem SINAMICS	30
5.1.1 Koncepce měniče v režimu VECTOR	31
5.1.2 Koncepce měniče v režimu SERVO	32
5.2 Zpracování analogových signálů w WinMOD	32

5.3	Komunikace s PLC	33
5.3.1	DSI jednomotorového motoru s regulací otáček	33
5.3.2	DSI pohonu v Master-Slave konfiguraci	34
5.3.3	Řídící a stavová slova	35
5.4	Sekvencer	36
5.5	Kanál žádané hodnoty (Setpoint channel)	38
5.5.1	Kanál žádané hodnoty v režimu VECTOR	38
5.5.2	Kanál žádané hodnoty v režimu SERVO	42
5.6	Zpětnovazební regulační smyčka (Closed loop control)	43
5.6.1	Regulátor otáček v režimu VECTOR	44
5.6.2	Regulátor otáček v režimu SERVO	44
5.6.3	Dodatečné hodnoty a omezení momentu	45
5.7	Řízení brzdy	46
5.8	Vyhodnocení chybových stavů	46
6	Ověření funkce digitálního dvojčete	47
6.1	Model zátěže pro implementaci do WinMOD	47
6.1.1	Model třecí charakteristiky	48
6.1.2	Pohybová rovnice	48
6.1.3	Model pohonu s měničem SINAMICS DCM	49
6.2	Testy jednomotorového pohonu v režimu VECTOR	50
6.2.1	Testy chování sekvenceru v režimu VECTOR	50
6.2.2	Testy regulační struktury a zátěže pohonu v režimu VECTOR	51
6.3	Testy pohonu v režimu SERVO a konfiguraci Master-Slave	55
6.3.1	Testy chování sekvenceru v režimu SERVO	56
6.3.2	Testy regulační struktury a zátěže pohonu v režimu SERVO	56
7	Závěr	61
	Literatura	63
	Přílohy	64
A	Modely měniče a zátěže	65
B	Testy jednomotorového pohonu	78
C	Testy pohonu v konfiguraci Master-Slave	93

Seznam použitých zkratek a symbolů

DCC	– Drive control chart
DSI	– Drive system interface - komunikační rozhraní systému pohonu
PLC	– Programmable logic controller - programovatelný automat
RFG	– Ramp function generator - generátor funkce rampy

Seznam obrázků

2.1	Moduly systému SINAMICS S120 [6]	14
3.1	Běžný technicko-inženýrský postup [8]	16
3.2	Technicko-inženýrský postup s využitím virtuálního zprovoznění [8]	17
4.1	Testovací stojany s měniči SINAMICS DCM (vlevo) a G120 (vpravo)	20
4.2	Asynchronní (vlevo) a DC motor (vpravo) spojené elektromagnetickou spojkou . . .	20
4.3	Konfigurace motorů a měničů G120 a DCM	21
4.4	Pracoviště pro testy s měniči SINAMICS G120 a DCM	21
4.5	Stanovení třecí charakteristiky jednomotorového pohonu	23
4.6	Měření momentu setrvačnosti z rozběhu naprázdno	24
4.7	Schéma propojení modulů a motorů sběrnicí Drive-CliQ	26
4.8	Stojan s měničem SINAMICS S120 a servomotory	27
4.9	Třecí charakteristika soustrojí se servomotory	28
5.1	Reálný pohon s měničem SINAMICS a jeho obraz v prostředí WinMOD	29
5.2	Zjednodušená regulační struktura	30
5.3	Drive navigator v režimu VECTOR (SINAMICS S120/G120)	31
5.4	Přehledové blokové schéma měniče v režimu VECTOR	31
5.5	Drive navigator v režimu SERVO (SINAMICS S120	32
5.6	Přehledové blokové schéma měniče v režimu SERVO	32
5.7	Nastavení fyzikálního rozsahu u proměnné	33
5.8	Stavový diagram sekvenceru [13]	36
5.9	Kanál žádané hodnoty v režimu VECTOR	38
5.10	Omezení otáček v prostředí SCOUT	38
5.11	Blokové schéma omezení otáček pro implementaci do prostředí WinMOD	39
5.12	Basic ramp function generator (Simotion SCOUT)	39
5.13	Vnitřní nastavení RFG (Simotion SCOUT)	40
5.14	Blokové schéma RFG pro implementaci do WinMOD	41

5.15	Základní setpoint channel v režimu SERVO (Simotion SCOUT)	42
5.16	Brzdná rampa v režimu SERVO (Simotion SCOUT)	42
5.17	Setpoint addition - blokové schéma pro implementaci do WinMOD	43
5.18	Blokové schéma regulátoru otáček v režimu VECTOR pro implementaci do WinMOD	44
5.19	Blokové schéma regulátoru otáček v režimu SERVO pro implementaci do WinMOD	45
5.20	Blokové schéma dodatečných momentů a momentového limitu	45
6.1	Struktura zátěže pohonu	47
6.2	Interpolační tabulka a její nastavení v prostředí WinMOD	48
6.3	Pohybová rovnice v prostředí WinMOD	49
6.4	Blok měniče SINAMICS DCM v prostředí WinMOD	49
6.5	Nastavení digitálních vstupů pro ovládání bitů řídicího slova	50
6.6	SINAMICS G120 - skok zátěže, optimální nastavení regulátoru	53
6.7	Simulink - skok zátěže, optimální nastavení regulátoru	53
6.8	WinMOD - skok zátěže, optimální nastavení regulátoru	54
6.9	Master-Slave uspořádání dvoumotorového pohonu [16]	55
6.10	S120 - Rozběh, změna Load Share 100-50-0%, doběh	58
6.11	Simulink - Rozběh, změna Load Share 100-50-0%, doběh	58
6.12	WinMOD - Rozběh, změna Load Share 100-50-0%, doběh	59
A.1	VECTOR - Zpracování vstupních a výstupních signálů	66
A.2	VECTOR - Sekvencer	67
A.3	VECTOR - Limitace otáček	68
A.4	VECTOR - Generátor funkce rampy	69
A.5	VECTOR - Regulátor otáček	70
A.6	VECTOR - Msupp	71
A.7	VECTOR - Limitace momentu	72
A.8	VECTOR - Generování signálu Pulse enable	73
A.9	VECTOR - Vyhodnocení chybových stavů	74
A.10	SERVO - Setpoint channel	75
A.11	SERVO - Zpětnovazební smyčka	76
A.12	SERVO - Ovládání brzdy	77
B.1	Testovací plocha pro ověření funkcí digitálního dvojčete jednomotorového pohonu s měničem G120/S120 v prostředí WinMOD	79
B.2	Model regulační struktury digitálního dvojčete v Matlab-Simulink	80
B.3	G120 - zapnutí a vypnutí signálem Enable operation - volný doběh	81
B.4	WinMOD - zapnutí a vypnutí signálem Enable operation - volný doběh	81
B.5	G120 - zapnutí a vypnutí signálem ON/OFF1	82

B.6	WinMOD - zapnutí a vypnutí signálem ON/OFF1	82
B.7	G120 - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF2 - volný doběh.	83
B.8	WinMOD - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF2 - volný doběh.	83
B.9	G120 - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF3	84
B.10	G120 - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF3	84
B.11	G120 - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF1 a přechod do OFF3	85
B.12	G120 - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF1 a přechod do OFF3	85
B.13	G120 - simulace poruchy	86
B.14	G120 - simulace poruchy	86
B.15	G120 - skok zátěže, pomalé nastavení regulátoru	87
B.16	Simulink - skok zátěže, pomalé nastavení regulátoru	88
B.17	WinMOD - skok zátěže, pomalé nastavení regulátoru	88
B.18	G120 - skok zátěže, rychlé (tvrdé) nastavení regulátoru	89
B.19	Simulink - skok zátěže, rychlé (tvrdé) nastavení regulátoru	90
B.20	WinMOD - skok zátěže, rychlé (tvrdé) nastavení regulátoru	90
B.21	G120 - dosažení momentového limitu	91
B.22	Simulink - dosažení momentového limitu	92
B.23	WinMOD - dosažení momentového limitu	92
C.1	Testovací plocha pro ověření funkcí digitálního dvojčete pohonu Master-Slave s měničem S120 v prostředí WinMOD	94
C.2	Testovací plocha pro ověření funkcí digitálního dvojčete pohonu Master-Slave s měničem S120 v prostředí Matlab-Simulink	95
C.3	S120 - zapnutí signálem Enable operation, vypnutí ON/OFF1	96
C.4	WinMOD - zapnutí signálem Enable operation, vypnutí ON/OFF1	96
C.5	S120 - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí Enable operation	97
C.6	WinMOD - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí Enable operation	97
C.7	S120 - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF3	98
C.8	WinMOD - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF3	98
C.9	S120 - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF2	99
C.10	WinMOD - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF2	99
C.11	S120 - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF1 a přechod do OFF3	100
C.12	WinMOD - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF1 a přechod do OFF3	100
C.13	S120 - Rozběh, doběh a zabrzdění naprázdno	101
C.14	WinMOD - Rozběh, doběh a zabrzdění naprázdno	102
C.15	Simulink - Rozběh, doběh a zabrzdění naprázdno	103
C.16	S120 - Rozběh a postupný pokles momentového limitu pohonu Slave	103
C.17	WinMOD - Rozběh a postupný pokles momentového limitu pohonu Slave	104

C.18 Simulink - Rozběh a postupný pokles momentového limitu pohonu Slave	105
C.19 S120 - Rozběh a postupný pokles momentového limitu pohonu Master	105
C.20 WinMOD - Rozběh a postupný pokles momentového limitu pohonu Master	106
C.21 Simulink - Rozběh a postupný pokles momentového limitu pohonu Master	107
C.22 S120 - Chyba pohonu Slave	107
C.23 WinMOD - Chyba pohonu Slave	108
C.24 Simulink - Chyba pohonu Slave	109
C.25 S120 - Chyba pohonu Master i Slave	109
C.26 WinMOD - Chyba pohonu Master i Slave	110
C.27 S120 - Chyba pohonu Master, Slave se stává Mastrem	111
C.28 WinMOD - Chyba pohonu Master, Slave se stává Mastrem	112
C.29 Simulink - Chyba pohonu Master, Slave se stává Mastrem	113
C.30 S120 - Rozběh a doběh s aktivní zátěží bez výtahové brzdy (SUTP)	113
C.31 S120 - Rozběh a doběh s aktivní zátěží a výtahovou brzdou (SUTP aktivní)	114
C.32 WinMOD - Rozběh a doběh s aktivní zátěží bez výtahové brzdy (SUTP), při zabrzdění zápis momentu a následný rozjezd s aktivní výtahovou brzdou	115

Seznam tabulek

4.1	Změřené hodnoty třecích momentů v závislosti na otáčkách	22
4.2	Změřené hodnoty momentu motoru a vypočtené dynamické momenty	24
5.1	DSI pohonu pro jednoduché aplikace	33
5.2	DSI Master-Slave pohonu	34
5.3	Význam signálů řídicího a stavového slova	35
6.1	Parametry hnacího pohonu (SINAMICS G120)	52
6.2	Parametry zatěžovacího pohonu (SINAMICS DCM)	52
6.3	Srovnání kvality regulace z testu jednomotorového pohonu s optimálním nastavením regulátoru	54
6.4	Absolutní a relativní odchylky parametrů kvality regulace jednomotorového pohonu získané v prostředích Simulink a WinMOD od výsledků získaných experimentálně	55
6.5	Nastavení parametrů Master,Slave a zatěžovacího pohonu	57
6.6	Srovnání kvality regulace z testu č.2 Master-Slave pohonu - změna koeficientu sdílení zátěže (LS)	60
6.7	Absolutní a relativní odchylky parametrů kvality regulace Master-Slave pohonu získané v prostředích Simulink a WinMOD od výsledků získaných experimentálně	60

Kapitola 1

Úvod

Digitalizace je fenomén, který doprovází průmyslové podniky po celá desetiletí, avšak s příchodem „Průmyslu 4.0“ dosahuje nové úrovně prostřednictvím řady nových technologií a inteligentních softwarových nástrojů. Jedním z nejdůležitějších trendů je „Digitální dvojče“, reprezentující digitální model reálného systému či zařízení, umožňující komplexní simulaci funkcí daného systému pro testy aplikačního softwaru. Aplikace digitálního dvojčete v průmyslové praxi může výrazně zjednodušit a ekonomicky zvýhodit návrh, realizaci, testování a uvádění řídicích systémů do provozu. [1] [2]

Předložená diplomová práce se zabývá návrhem digitálních dvojčat elektrických pohonů s měniči Siemens SINAMICS S120. V první části je krátce obecně popsán koncept digitálního dvojčete a prostředky virtuálního zprovoznění. Vybraným řešením pro tvorbu modelů je primárně simulační prostředí WinMOD. Pro potřeby ověření funkce regulační struktury měničů je dodatečně využito prostředí Matlab-Simulink.

Ve třetí kapitole je popsána předloha pro digitální dvojče v podobě dvou pracovišť s elektrickými motory a měniči SINAMICS. Zaprvé se jedná o soustrojí s asynchronním motorem napájeným s měničem SINAMICS G120 a zatěžovacím stejnosměrným motorem s měničem SINAMICS DCM. Druhé pracoviště sestává ze soustrojí tvořeného třemi synchronními motory s permanentními magnety napájenými z měniče SINAMICS S120, kde dva z motorů byly provozovány jako pohon v konfiguraci Master-Slave a třetí jako zátěž. Kapitola uvádí také výsledky měření mechanických vlastností obou soustrojí včetně metodiky určení.

Čtvrtá kapitola uvádí postup tvorby modelů měniče SINAMICS S120, počínajíc od koncepce struktury modelů v režimu VECTOR a SERVO. Dále je detailně popsána tvorba jednotlivých bloků a jejich propojení ve funkčním celku. Na konci kapitoly jsou představeny a popsány finální verze vytvořených modelů.

Poslední kapitola představuje tvorbu digitálních dvojčat pracovišť popsaných ve třetí kapitole a popisuje testy prováděné pro ověření funkce sekvenční řídicí logiky a funkce zpětnovazební regulační smyčky otáček. Na konci je provedeno srovnání výsledků vybraných simulací v prostředí WinMOD a Matlab-Simulink s výsledky experimentů na reálném soustrojí, včetně výpočtů odchylek.

Kapitola 2

Měniče Siemens SINAMICS S120

SINAMICS je produktová skupina měničů společnosti Siemens určených pro aplikace ve strojní a výrobní technice. SINAMICS nabízí řešení pro všechny aplikace od jednoduchých čerpadel a ventilátorů po vysoce dynamické servopohony pro obráběcí a balicí stroje.

V závislosti na aplikaci nabízí řada SINAMICS frekvenční měniče:

- SINAMICS G pro standardní aplikace s asynchronními motory
- SINAMICS S pro náročné aplikace s asynchronními a synchronními motory [3]

SINAMICS S120 je modulární frekvenční měnič určený pro náročné aplikace pohonů především v oblasti Motion control na výrobních strojích ve výkonovém rozsahu 1,6 kW až 1200 kW. Je navržen pro vysoce dynamické polohování a synchronizaci více os a dodáván v modulárním (booksize) nebo vestavném provedení. [4]

2.1 Moduly SINAMICS S120

- **Řídicí jednotka** - provádí výpočty pro řízení výkonové části měniče a současně poskytuje rozhraní k nadřazenému systému, s nímž komunikuje isochronním, tedy velmi rychlým a časově přesným protokolem. Typy:
 - CU310-2 pro jednoosé aplikace
 - CU320-2 pro víceosé aplikace
- **Napájecí jednotka** - vytváří stejnosměrný meziobvod frekvenčního měniče. Provedení:
 - Basic Line Module - nejlevnější, tyristorový/diodový můstek (2Q) bez rekuperace
 - Smart Line Module - IGBT můstek, ve zpětném směru synchronizováno s napájecí sítí
 - Active Line Module - nejdražší, IGBT můstek (4Q), ve zpětném směru řízené pulsně šířkovou modulací; sinusový odběr i rekuperace proudu s definovaným účíníkem

- **Motorové moduly** - střídače napájející připojené motory. Existuje jednomotorová a dvoumotorová jednotka se jmenovitým proudem 3 až 200 A v provedení "booksize" a výkonem 75 až 1200 kW ve vestavném provedení.
- Snímačové, I/O a další volitelné karty a moduly. [4][5]



Obrázek 2.1: Moduly systému SINAMICS S120 [6]

2.2 Komunikační sběrnice

Pro přenos dat mezi jednotlivými moduly měniče nebo mezi měničem a nadřazeným řídicím prvkem (systémem) SINAMICS S120 podporuje tyto komunikační sběrnice:

- **DRIVE-CLiQ** - spojuje řídicí jednotku s ostatními moduly pohonu. Vždy je nutné použít originální kabely Siemens DRIVE-CLiQ pro záruku bezporuchového provozu.
- **PROFIBUS** - otevřený komunikační standard založený na Fieldbusu.
- **PROFINET** - otevřený komunikační standard založený na průmyslovém Ethernetu. [3] [5]

2.3 Režimy vektorového řízení

U měničů SINAMICS S120 jsou k dispozici dva typy režimů vektorového řízení:

1. Režim VECTOR (Vector control)

Vektorové řízení je k dispozici u všech frekvenčních měničů SINAMICS popsaných v [5]. Pohon v tomto režimu může být provozován:

- S regulací otáček s nebo bez enkodéru
- S řízením momentu s nebo bez enkodéru

Výhody spočívají v dobré dynamice a vysoké přesnosti točivého momentu. Nevýhodou může být složitost a citlivost na změny parametrů například vlivem teploty. Typickými aplikacemi jsou pohony s asynchronními motory například v papírenských strojích, navíječkách a zvedacích zařízeních, avšak lze v tomto režimu provozovat také synchronní motory se samostatným buzením či s permanentními magnety.

2. Režim SERVO (Servo control)

Servořízení je k dispozici ve standardním firmwaru všech jednotek SINAMICS S120. Pohon v tomto režimu může být provozován:

- S regulací otáček s nebo bez enkodéru
- S regulací točivého momentu pomocí enkodéru
- S regulací polohy pomocí enkodéru

Výhody servořízení spočívají v jeho mimořádně vysoké dynamické odezvě vlivem vysoké rychlosti regulátoru proudu. Nevýhoda spočívá v přesnosti točivého momentu, která je nižší než ta poskytovaná režimem VECTOR.

Typickými aplikacemi jsou pohony s vysoce dynamickým řízením pohybu například v obráběcích strojích a průmyslových robotech. [5]

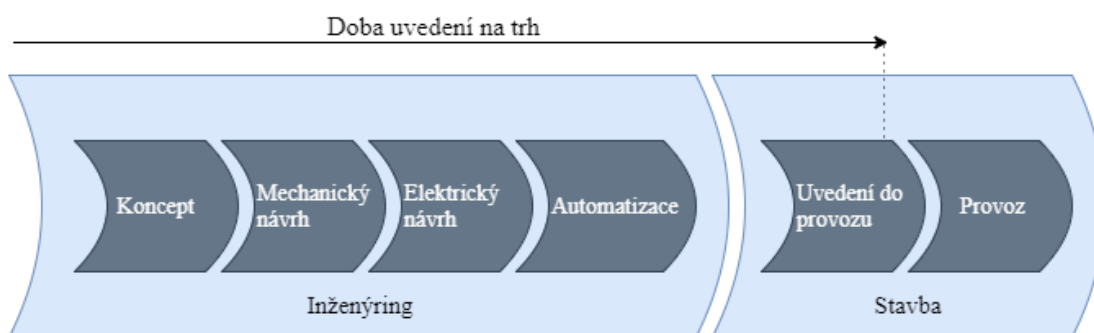
Kapitola 3

Virtuální zprovoznění

Hlavními trendy ve výrobním průmyslu je zrychlení vývoje novinek, co nejrychlejší zahájení výroby, růst flexibility a variability výroby, snižování nákladů, a to vše za současného zvyšování kvality. Z toho plynou krátké termíny pro inženýrské a technologické firmy, značný stres a nízká tolerance chyb při oživování strojů.

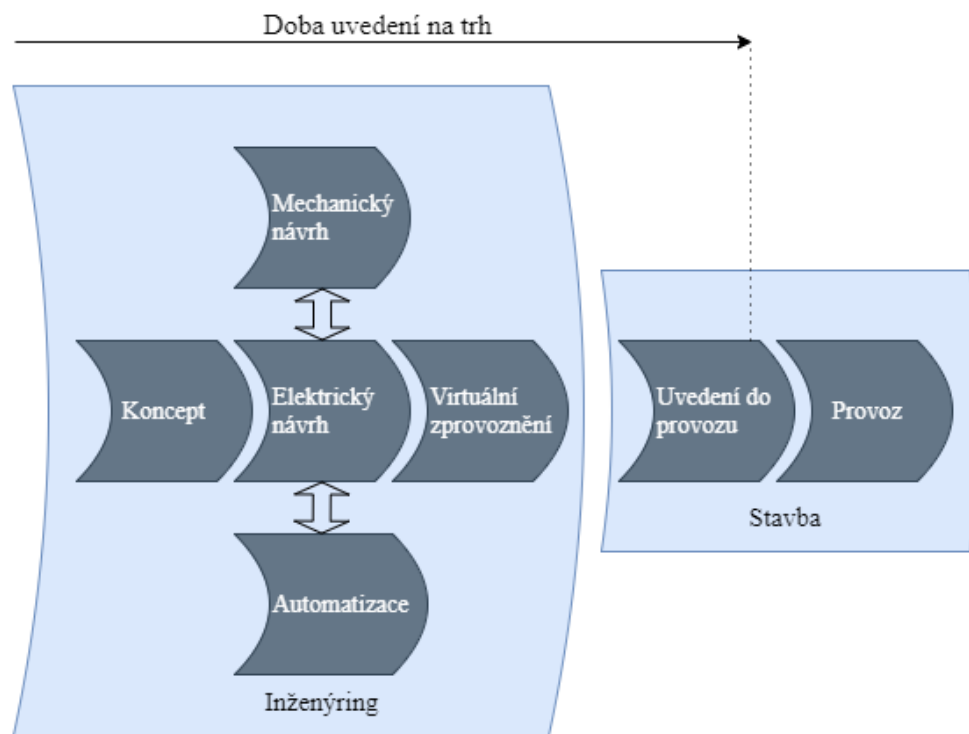
3.1 Význam a opodstatnění

Virtuální zprovoznění digitálního dvojčete zařízení či systému znamená počítačovou simulaci chování jeho modelu. Vlastnosti modelu jsou přitom zcela totožné s reálným zařízením, včetně kinematiky, PLC programu a komunikace s řídicím systémem. Tento postup dovoluje naprogramovat řídicí systém i ovládací obrazovky stroje či výrobní linky předem a všechny jeho funkce bez jakéhokoliv rizika vyzkoušet. Při instalaci nových prvků do výrobních linek, jejich zapojení, odzkoušení a předání zákazníkovi je čas velmi drahý, a proto se pracuje s minimálními rezervami. Zkoušet funkčnost navržených řešení až při instalaci představuje značné riziko. Časový tlak navíc zvyšuje riziko chyb, které mohou mít při spuštění zařízení fatální dopad.[7]



Obrázek 3.1: Běžný technicko-inženýrský postup [8]

Obrázek 3.1 uvádí běžný sekvenční technicko inženýrský postup uvádění produktu na trh. Zařazení virtuálního zprovoznění digitálního dvojčete vyráběného zařízení do tohoto postupu (obrázek 3.2) dovoluje ověření funkce navržených mechanických, elektrických a řídicích systémů již ve fázi inženýringu, což může výrazně zkrátit čas následného uvádění do provozu a snížit riziko potenciálního vzniku škody na zařízení.



Obrázek 3.2: Technicko-inženýrský postup s využitím virtuálního zprovoznění [8]

3.2 Softwarové prostředky

Software pro virtuální zprovoznění je obecně simulační a vizualizační nástroj pracující v reálném čase, sloužící pro komplexní testování chování řízených aplikací, komponentů, strojů a různých instalací v průmyslu. Simulační program komunikuje s řídicím systémem v reálném čase pomocí komunikační sběrnice.

- **WinMOD**

WinMOD existuje od roku 1995 pro systém Windows a poskytuje prostředí pro modelování systémů, virtualizaci a virtuální zprovoznění. Systém WinMOD nahrazuje systém v reálném světě virtualizovaným systémem simulujícím chování v reálném čase. Vizualizace signálů, reakcí a časových průběhů je transparentní a přehledná. Uživatel má příležitost k okamžité

interakci se simulovaným systémem. WinMOD tak umožňuje testování různých technologických procesů včetně simulace poruch či havarijních stavů.

Prostředí WinMOD vyžaduje k funkci pouze PC s nainstalovaným WinMODem a komunikační kartou zasunutou do PCI slotu, pomocí které WinMOD může komunikovat s PLC. Vlastní simulace v prostředí WinMOD je tvořena konfigurací a propojováním základních binárních, digitálních či analogových funkčních elementů. [2][9]

WinMOD je hlavním simulačním nástrojem pro účely této práce.

- **Matlab-Simulink**

Matlab s knihovnou Simulink je velmi mocný nástroj pro matematické modelování různých druhů systémů. Pro simulace v reálném čase lze využít například toolbox Simulink Desktop Real-Time. K dispozici jsou také toolboxy umožňující komunikaci s externími zařízeními pomocí průmyslových sběrnic. [10] Nevýhodou může být však vysoká cena.

V rámci práce je prostředí Matlab-Simulink využito zejména pro ověření simulačních výsledků získaných v prostředí WinMOD.

- **SIMIT**

SIMIT je simulační software dodáván firmou Siemens, sloužící pro kompletní simulaci procesů v reálném čase. Poskytuje podobné možnosti simulace jako prostředí WinMOD. SIMIT může komunikovat s mnoha programovatelnými automaty různých výrobců a také s jinými softwarovými nástroji jako Matlab-Simulink či NX MCD. [2]

- **NX MCD**

NX Mechatronic Concept Designer od společnosti Siemens PLM umožňuje multidisciplinární přístup ke konstrukci strojů a podporuje lepší spolupráci mezi elektrotechnickými, mechanickými a automatizačními inženýry.

Softwarový balíček umožňuje výrobcí strojů vytvořit mechatronický model založený na existujících 3D CAD datech za účelem mapování fyzikálních a kinematických vlastností strojů včetně údajů o pohybu, toku materiálu, gravitaci, kolizi atd. To umožňuje konstruktérům strojů určit dodatečné vlastnosti navrhovaných systémů a stanovit toky a využití energie.

Virtuální znázornění stroje lze také použít k simulaci a ověření základních funkcí. Ve spojení s prostředím SIMIT lze NX MCD použít také pro virtuální zprovoznění. [11]

Kapitola 4

Předloha pro digitální dvojče měniče SINAMICS

Předloha pro digitální dvojče pohonu s měničem SINAMICS S120 je dvojího druhu:

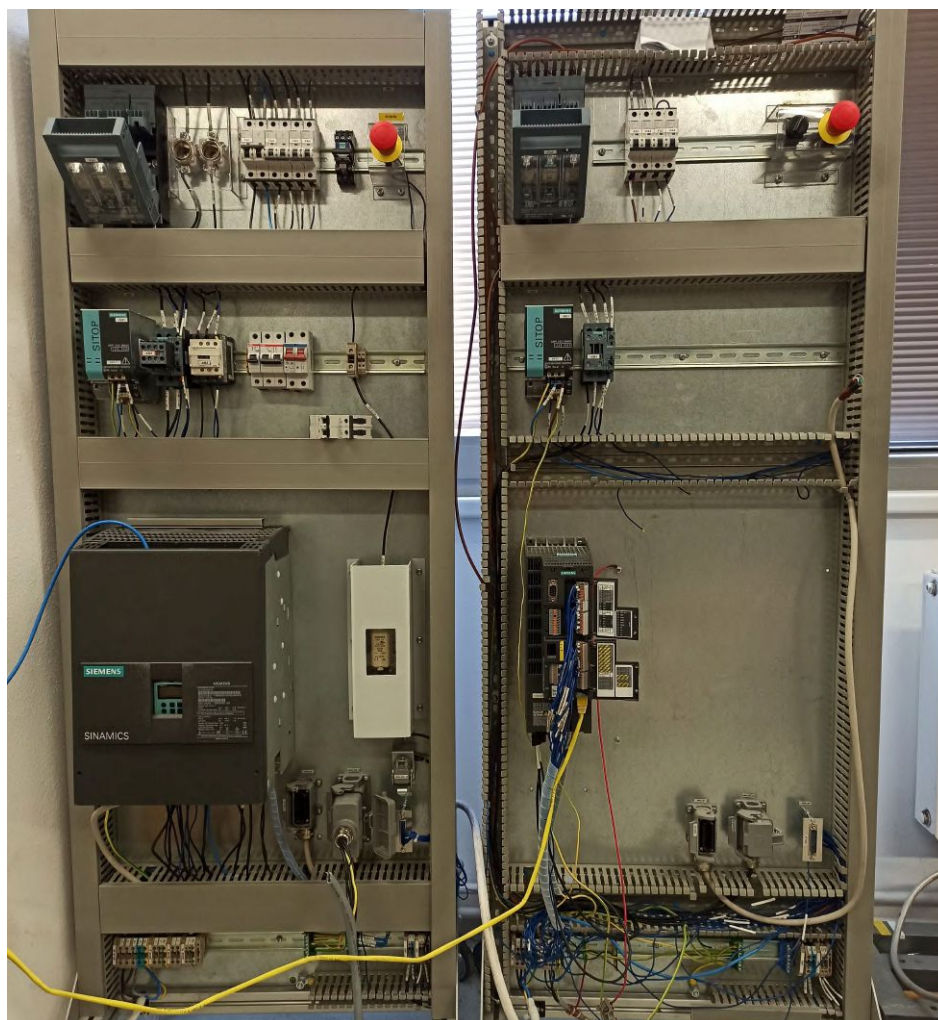
1. Jednomotorový pohon s asynchronním motorem a měničem SINAMICS G120 v režimu VECTOR
2. Pohon v konfiguraci Master-Slave se synchronními motory s permanentními magnety a měničem SINAMICS S120 v režimu SERVO

4.1 Pohon s měničem G120 v režimu VECTOR

Předlohou pro digitální dvojče v režimu VECTOR bylo stanoviště uvedené na obrázcích 4.1 a 4.2. Hnací pohon sestává z třífázového asynchronního motoru napájeného z frekvenčního měniče Siemens SINAMICS G120 a zatěžovací pohon ze stejnosměrného motoru s cizím buzením napájeného z měniče Siemens SINAMICS DCM. Měnič G120 byl využit místo měniče S120 zejména s ohledem na dostupnost a skutečnost, že z hlediska využívaných funkcí a požadovaných vlastností modelů jsou tyto měniče zaměnitelné.

4.1.1 Komponenty pracoviště

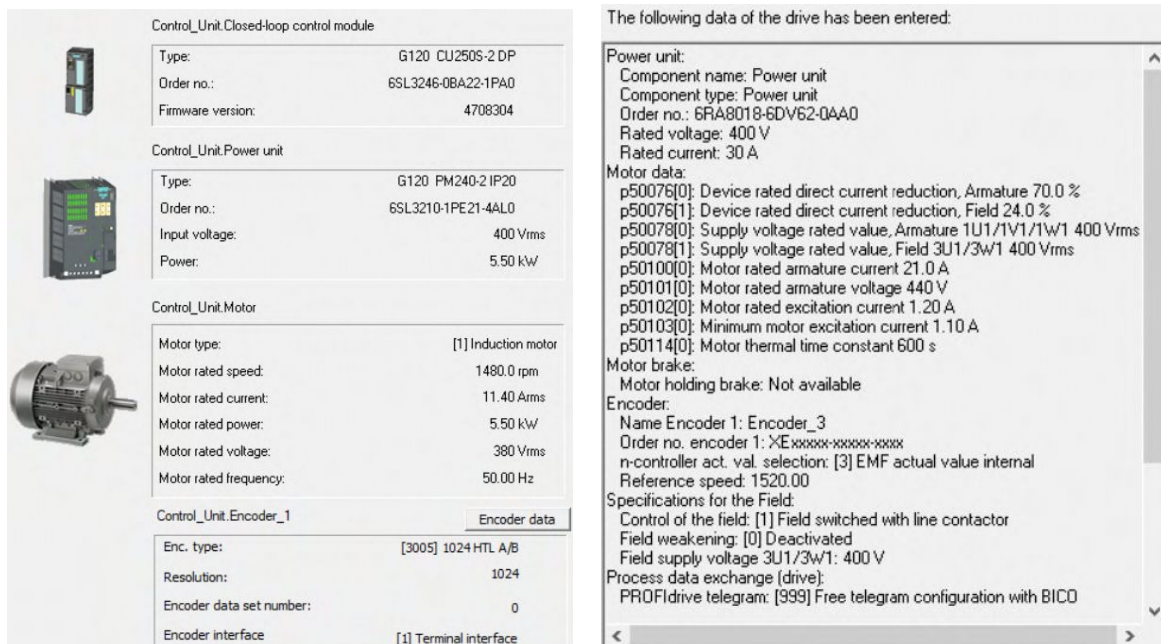
Stojany s měniči lze vidět na obrázku 4.1. Pohony byly ovládány buď přímo z prostředí Simotion SCOUT nebo pomocí ovládacího panelu připojeného na digitální vstupy měniče. Na obrázku 4.2 je zobrazeno používané soustrojí. Hřídele obou motorů byly spojovány pomocí elektromagnetické spojky ovládané jističem.



Obrázek 4.1: Testovací stojany s měniči SINAMICS DCM (vlevo) a G120 (vpravo)



Obrázek 4.2: Asynchronní (vlevo) a DC motor (vpravo) spojené elektromagnetickou spojkou



(a) Parametry asynchronního motoru a měniče SINAMICS G120 (Simotion SCOUT) (b) Parametry DC motoru a měniče SINAMICS DCM (Simotion SCOUT)

Obrázek 4.3: Konfigurace motorů a měničů G120 a DCM



Obrázek 4.4: Pracoviště pro testy s měniči SINAMICS G120 a DCM

4.1.2 Měření třecí charakteristiky jednomotorového pohonu

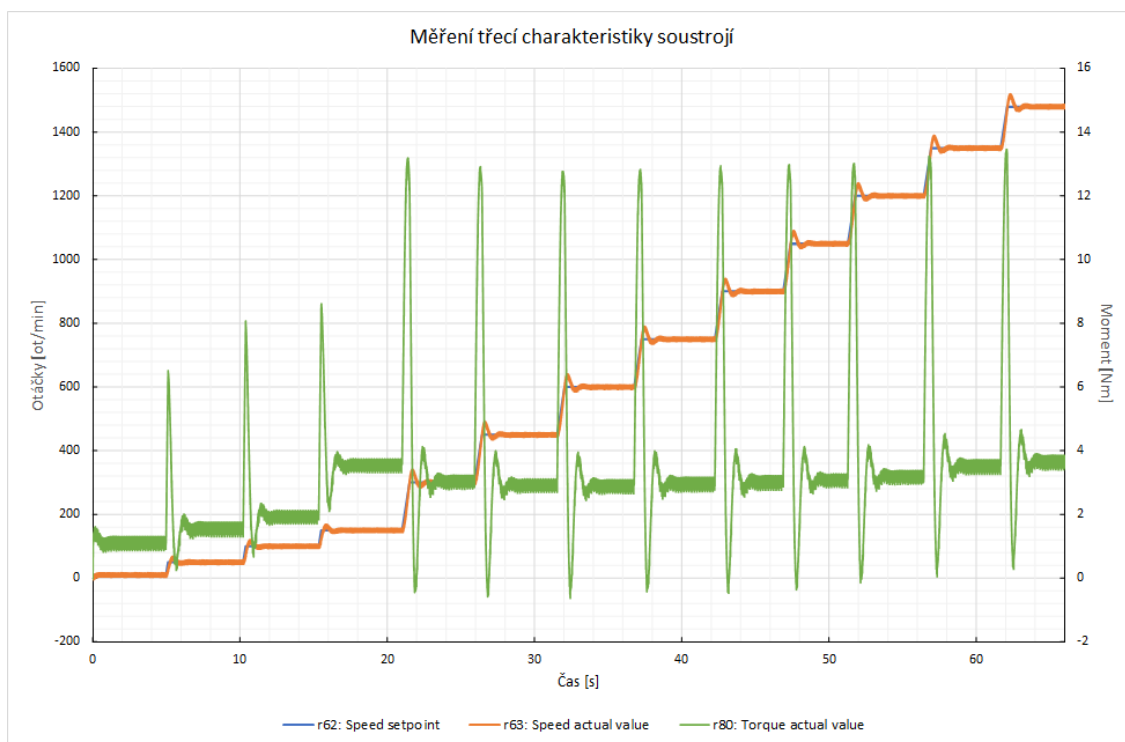
Třecí charakteristika znázorňuje závislost ztrátových mechanických (třecích) momentů proti směru otáčení soustrojí na jeho otáčkách. Měření bylo provedeno následujícím způsobem (obrázek 4.5a):

1. Asynchronní motor byl elektromagnetickou spojkou spojen s DC motorem, který byl během měření vypnut.
2. Pohon s asynchronním motorem byl postupně rozbíhán na otáčky v rozmezí 0 až 1480 ot/min.
3. Při vybraných otáčkách byl po ustálení přech. dějů odečítán skutečný moment asynchronního motoru, který se v tomto případě rovná třecímu momentu M_f .

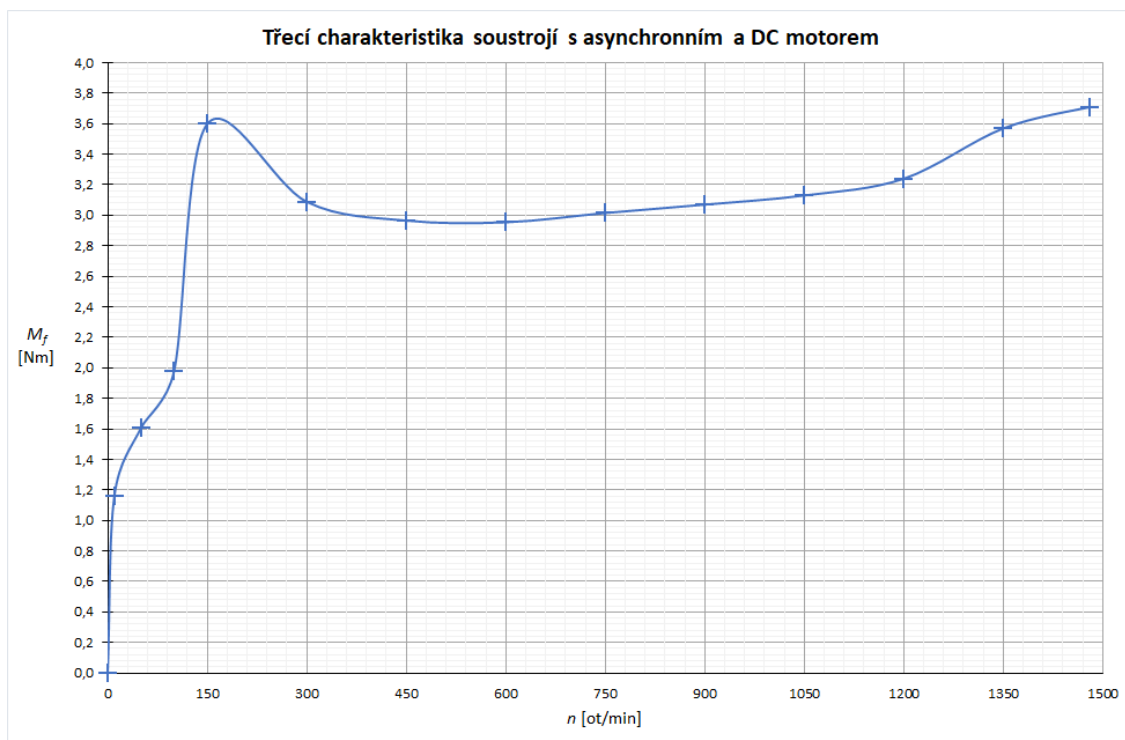
Změřené hodnoty jsou seřazeny v tabulce 4.1 a závislost $M_f = f(n)$ vynesena graficky na obrázku 4.5b. Stejná třecí charakteristika je uvažována pro oba směry otáčení soustrojí. Model třecí charakteristiky v prostředí WinMOD je popsán v kapitole 6.1.1.

Tabulka 4.1: Změřené hodnoty třecích momentů v závislosti na otáčkách

Otáčky n [ot/min]	Třecí moment M_f [Nm]
0	0
10	1,16
50	1,61
100	1,98
150	3,60
300	3,09
450	2,97
600	2,95
750	3,02
900	3,07
1050	3,13
1200	3,24
1350	3,57
1480	3,71



(a) Měření třecí charakteristiky soustrojí s asynchronním a DC motorem



(b) Třecí charakteristika soustrojí s asynchronním a DC motorem

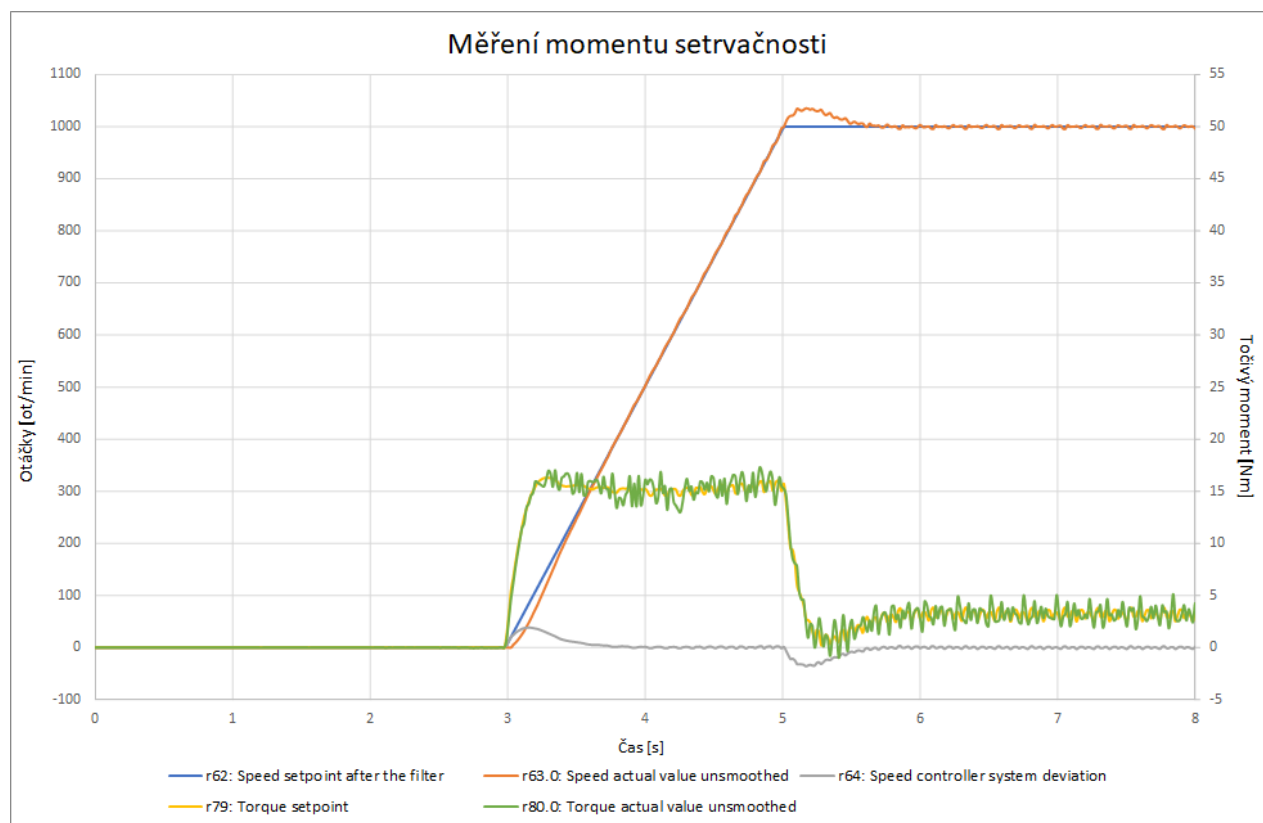
Obrázek 4.5: Stanovení třecí charakteristiky jednomotorového pohonu

4.1.3 Měření momentu setrvačnosti jednomotorového pohonu

Moment setrvačnosti byl změřen z rozběhu pohonu na obrázku 4.6. Motor byl rozběhnut na 1000 ot/min, doba náběhové rampy je 2 sekundy. Hodnoty momentu motoru byly odečítány při otáčkách, při nichž byly v minulé podkapitole stanovovány třecí momenty. V tabulce 4.6 jsou uvedeny hodnoty momentu motoru v oblasti, v níž lze předpokládat konstantní zrychlení, tedy od 150 do 900 ot/min.

Tabulka 4.2: Změřené hodnoty momentu motoru a vypočtené dynamické momenty

Otáčky n [ot/min]	Moment motoru Mf [Nm]	Třecí moment Mf [Nm]	Dynamický moment Md [Nm]
150	15,43	3,60	11,83
300	15,26	3,09	12,17
450	15,06	2,97	12,09
600	15,19	2,95	12,24
750	15,09	3,02	12,07
900	15,03	3,07	11,96



Obrázek 4.6: Měření momentu setrvačnosti z rozběhu naprázdno

Dynamické momenty při jednotlivých hodnotách otáček jsou dány rozdílem momentu motoru a působícího proti němu třecího momentu soustrojí:

$$M_d = M - M_f = 15,43 - 3,60 = 11,83 \text{ Nm} \quad (4.1)$$

Aritmetický průměr dynamických momentů:

$$M_{d,průměr} = \frac{\sum_i^n M_{f,i}}{n} = \frac{11,83 + 12,17 + 12,09 + 12,24 + 12,07 + 11,96}{6} = 12,06 \text{ Nm} \quad (4.2)$$

Z pohybové rovnice je pak celkový moment setrvačnosti stanoven jako

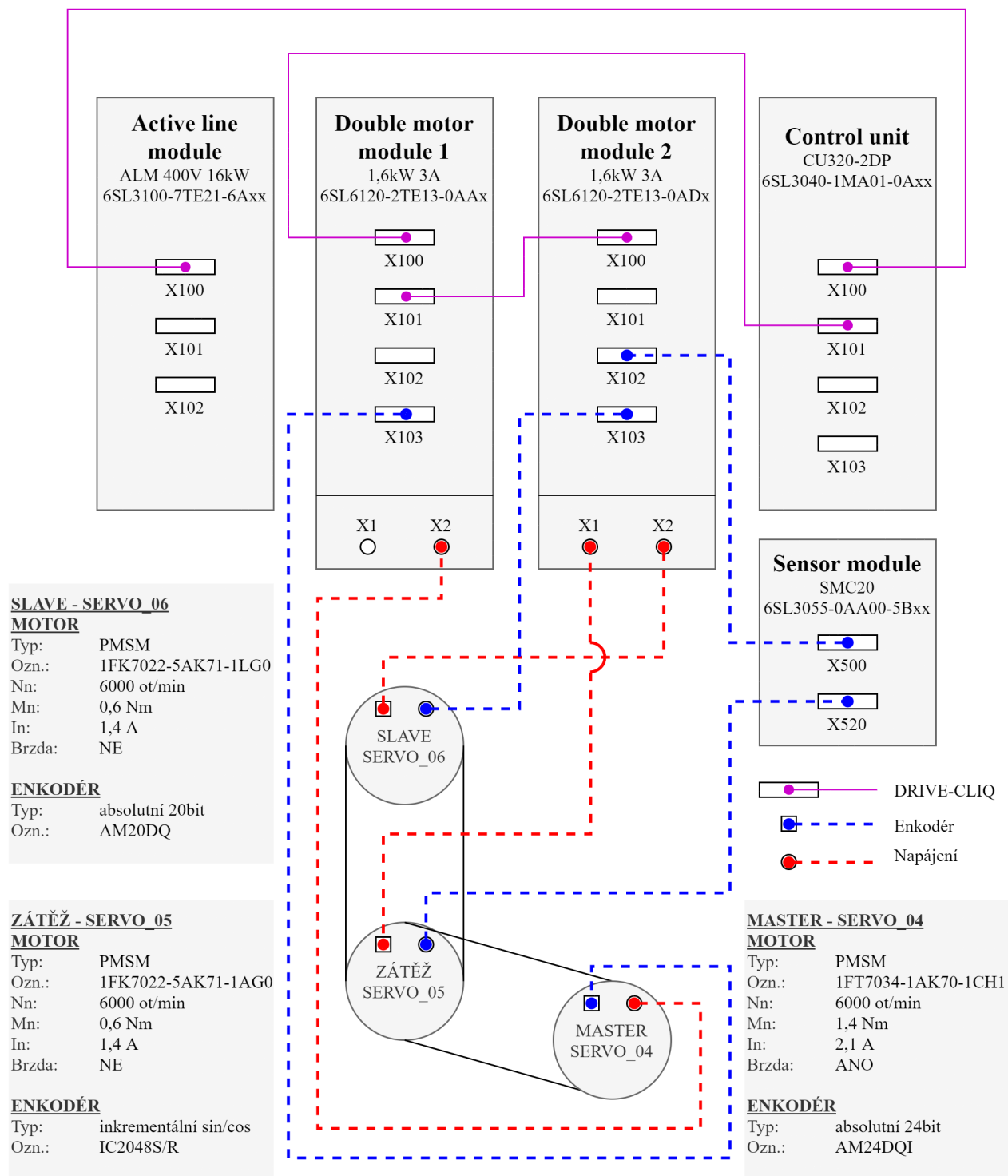
$$J_c = M_{d,průměr} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta \omega} = 12,06 \cdot \frac{2}{1000 \cdot \frac{2\pi}{60}} = 0,23 \text{ kgm}^2 \quad (4.3)$$

4.2 Pohon Master-Slave s měničem S120 v režimu SERVO

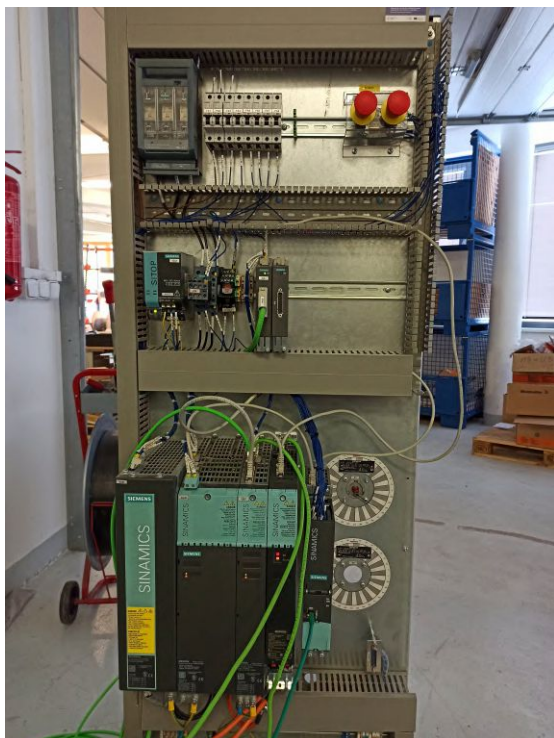
Předlohou pro digitální dvojčce pohonu v konfiguraci Master-Slave je pracoviště s měničem SINAMICS S120 v režimu SERVO (r107 = [11] SERVO) a třemi synchronními servomotory s permanentními magnety. Dva z nich byly použity pro Master-Slave konfiguraci a třetí k simulaci zátěže.

Jednotlivé moduly a pohony byly propojeny pomocí sběrnice DRIVE-CLIQ podle zásad a doporučení uvedených v manuálu pro uvádění měničů SINAMICS S120 do provozu [12]. Topologie modulů měniče je na obrázku 4.7. Motory byly spolu svázány pomocí gumových řemenů, vazba mezi nimi je tedy reálně pružná, avšak pro potřeby následných simulací je považována za tuhou. Fotografie testovacího stojanu, stojanu se servomotory a celého pracoviště je na obrázku 4.8. Použité moduly měniče S120:

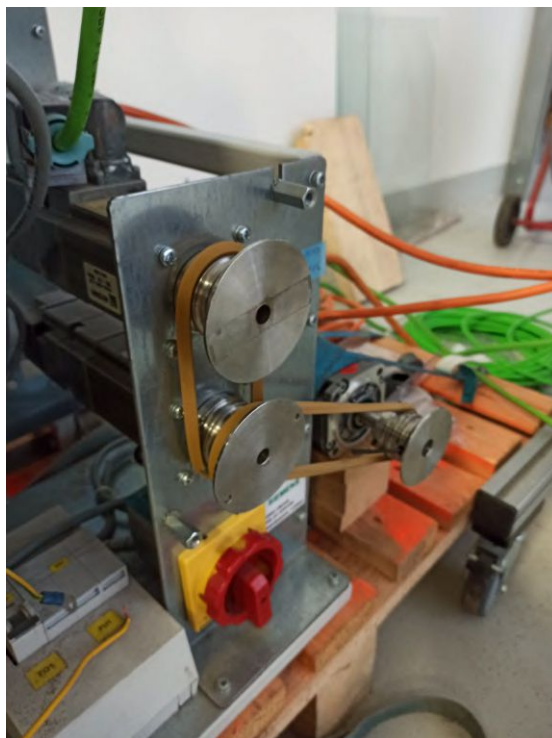
- 1x Řídicí jednotka - Control Unit CU320-2DP
- 1x Napájecí jednotka (usměrňovač) - Active Line Module ALM 400V 16kW
- 2x Dvoumotorový modul (střídač) - Double Motor Module DMM 1,6kW 3A



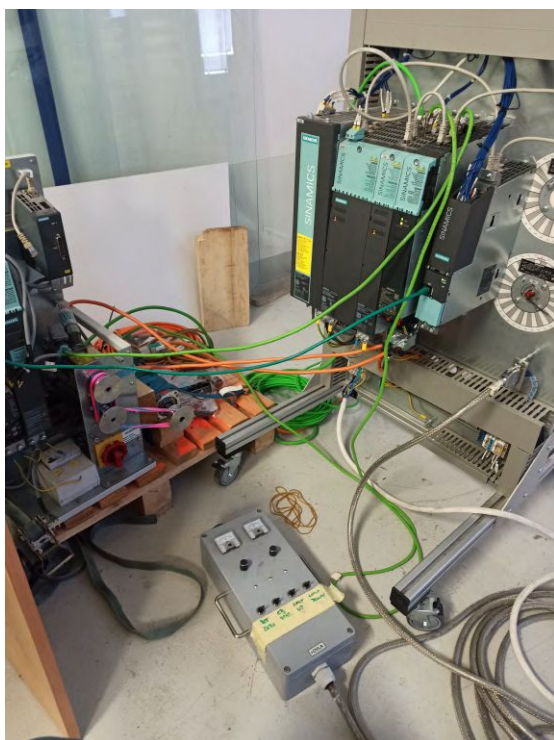
Obrázek 4.7: Schéma propojení modulů a motorů sběrnice Drive-CliQ



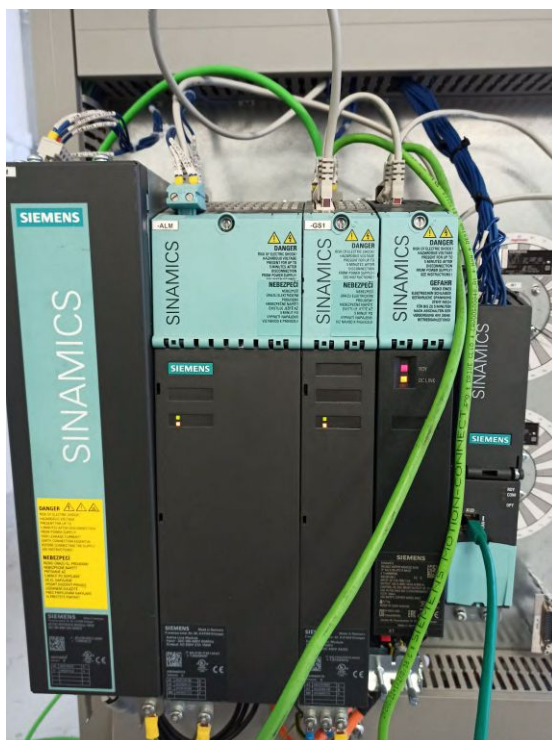
(a) Stojan s měničem SINAMICS S120



(b) Paleta se servomotory



(c) Pracoviště pro testy s pohonem v Master-Slave konfiguraci

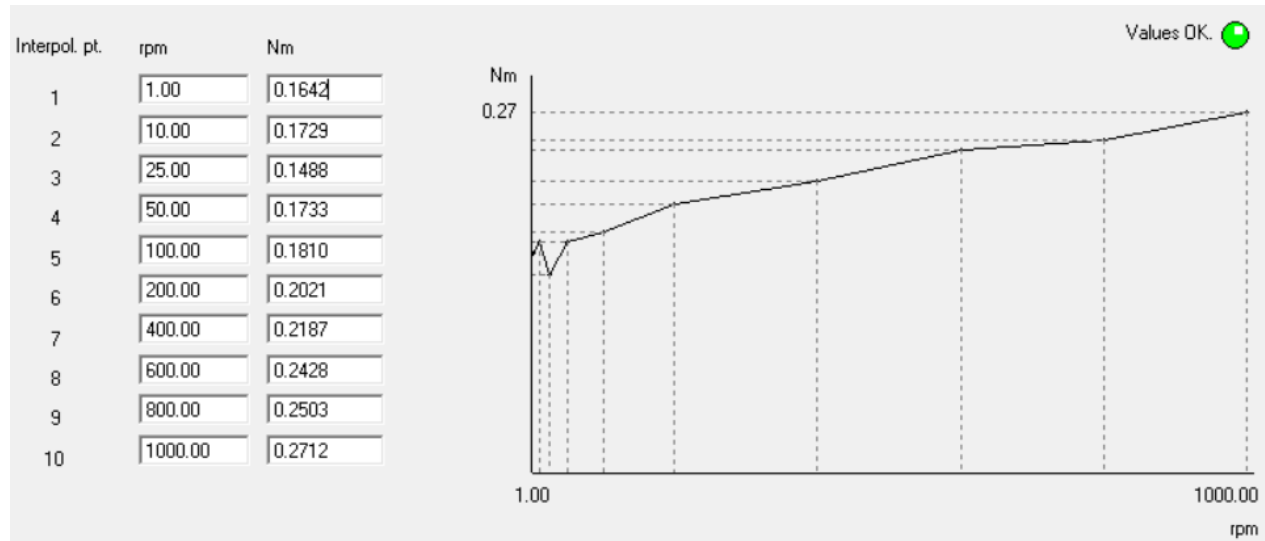


(d) Moduly měniče SINAMICS S120

Obrázek 4.8: Stojan s měničem SINAMICS S120 a servomotory

4.2.1 Měření třecí charakteristiky Master-Slave pohonu

Třecí charakteristika zde byla určena pomocí automatické funkce Friction characteristic record. Naměřená data z prostředí SCOUT jsou na obrázku 4.9.



Obrázek 4.9: Třecí charakteristika soustrojí se servomotory

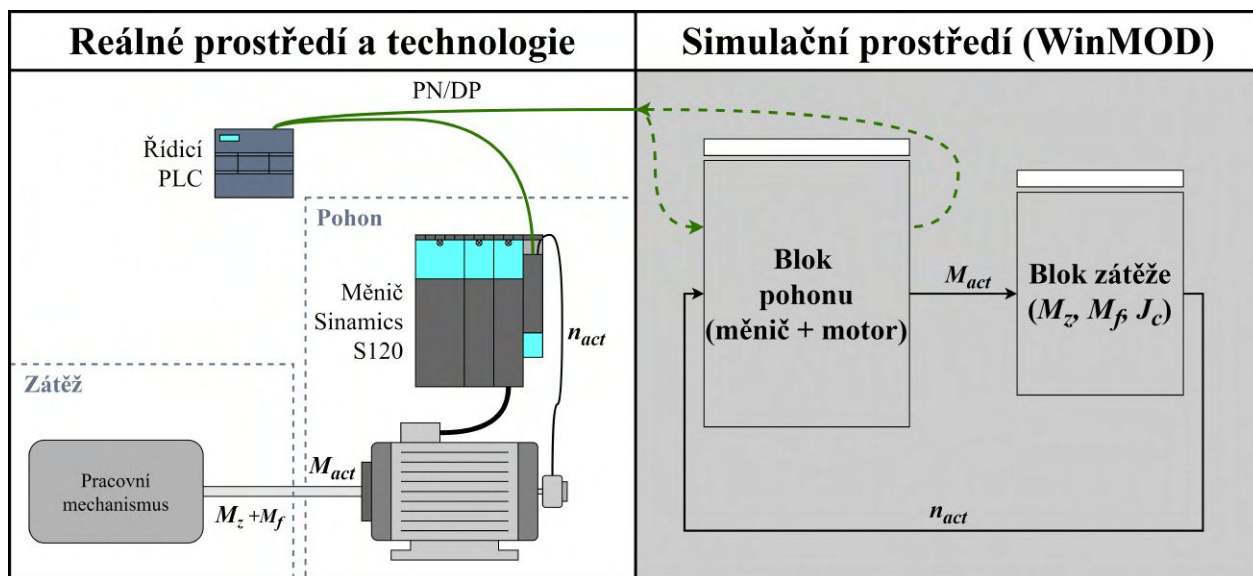
4.2.2 Měření momentu setrvačnosti Master-Slave pohonu

Moment setrvačnosti byl stanoven pomocí automatické funkce Turning Measurement. Jeho hodnota byla změřena $J_c = 4,2 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$.

Kapitola 5

Tvorba modelů měniče

V reálném automatizačním systému lze elektrický regulovaný pohon považovat za subsystém podle obrázku 5.1. Je řízen buď pomocí digitálních a analogových vstupů, nebo pomocí průmyslové komunikační sběrnice. Jeho výstupem je skutečný (hnací) moment na hřídeli motoru M_{act} . Rozdílem hnacích, zátěžných M_z a třecích momentů soustrojí M_f je dynamický moment, jež způsobuje urychlení či zpomalení setrvačných hmot. Výsledná rychlost otáčení n_{act} je zavedena jako zpětná vazba zpět do měniče, který pak poskytuje zpětnou vazbu nadřazenému řídicímu prvku pomocí digitálních a analogových výstupů nebo opět přes zvolenou průmyslovou sběrnici.



Obrázek 5.1: Reálný pohon s měničem SINAMICS a jeho obraz v prostředí WinMOD

Cílem této kapitoly je v simulačním prostředí WinMOD vytvořit digitální dvojče měniče SINAMICS S120, z hlediska zařazení elektrického pohonu do automatizačního systému se stejnými funkcemi a vlastnostmi jako jeho reálný protějšek, v následujících konfiguracích:

1. Pohon s asynchronním motorem v režimu VECTOR (r107 = [12]).
2. Pohon se synchronním motorem s permanentními magnety v režimu SERVO (r107 = [11]).

Během modelování digitálního dvojčete byly hlavními referenčními body prostředí Simotion SCOUT a funkční diagramy uvedené v [13]. Názvy jednotlivých bloků jsou ponechány tak, jak jsou uvedeny v záložkách SCOUTu. Každý blok je podrobně popsán v následujících podkapitolách.

5.1 Koncepce digitálního dvojčete pohonu s měničem SINAMICS

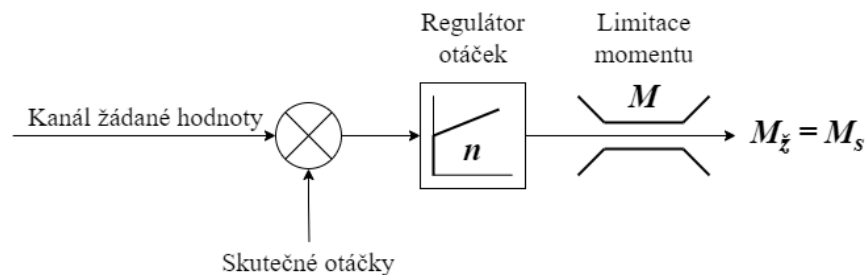
Pohon se střídavým motorem a frekvenčním měničem s vektorovým řízením tvoří z matematického hlediska velmi komplexní systém. Struktura vektorového řízení asynchronního motoru s nepřímým měničem frekvence je detailně popsána například v [14].

Z regulačního hlediska nejkomplexnější částí celé struktury je skupina bloků potřebných k modelování elektromagnetických a elektromechanických dějů a vytvoření požadovaného točivého momentu. Pro simulace v reálném čase, konkrétně v prostředí WinMOD, je prakticky nemožné tuto část struktury spolehlivě realizovat z následujících důvodů:

- vysoká náročnost z hlediska výpočetního výkonu, zejména v případě simulací v reálném čase,
- náročnost na rychlost výpočtů (nejkratší délka simulačního kroku v WinMOD je 1ms),
- celková komplikovanost a z toho vyplývající náročnost na tvorbu, ladění a úpravy.

S přihlédnutím k výše uvedeným omezením je logickým krokem snaha tuto část struktury v simulacích zanedbat. Základní zjednodušení tedy přímo vyplývá z této skutečnosti - předpoklad, že skutečný moment pohonu je roven výstupnímu žádanému momentu z regulátoru otáček.

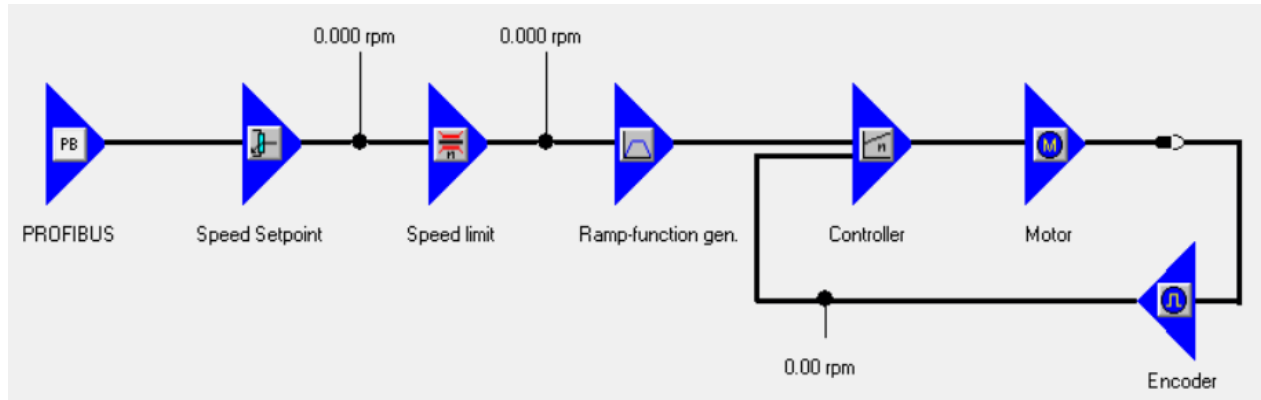
Uvedeným způsobem upravená regulační struktura je zobrazena na obrázku 5.2. Vstupem struktury jsou požadované otáčky motoru z kanálu žádané hodnoty (Setpoint Channel). Rozdíl žádaných a skutečných otáček motoru je zaveden do PI regulátoru otáček s omezením momentu. Výstupem je požadovaný moment, v tomto případě považován za rovný skutečnému momentu na hřídeli motoru.



Obrázek 5.2: Zjednodušená regulační struktura

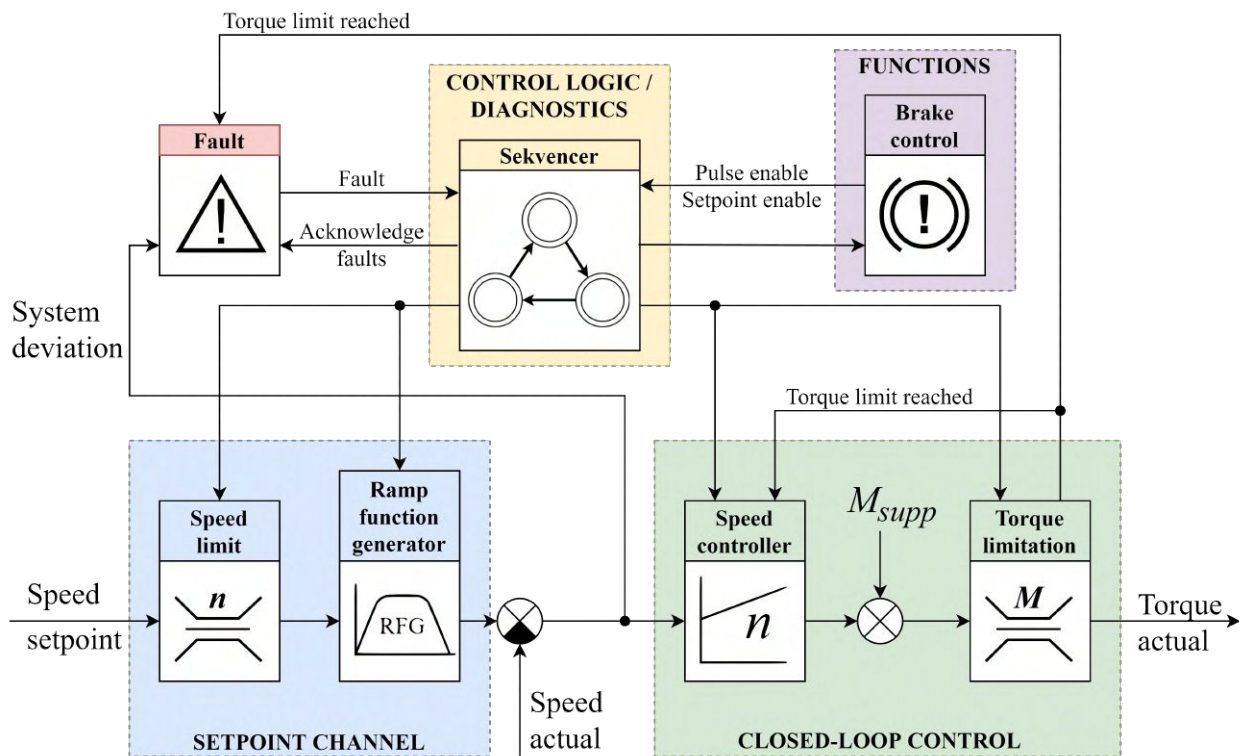
5.1.1 Koncepte měniče v režimu VECTOR

Výše uvedené uspořádání v podstatě vychází ze zjednodušeného zobrazení regulační struktury v prostředí Simotion SCOUT, záložka Drive Navigator (obrázek 5.3).



Obrázek 5.3: Drive navigator v režimu VECTOR (SINAMICS S120/G120)

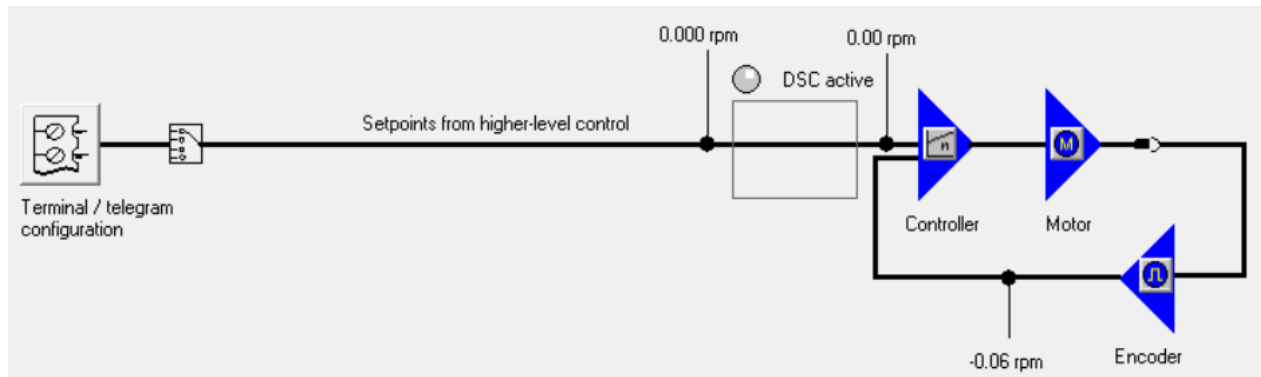
Přehledové schéma na obrázku 5.4 zobrazuje blokové uspořádání digitálního dvojčete s propojením důležitých signálů, popisujících vzájemný vliv jednotlivých bloků. Například dosažení momentového limitu má vliv na zastavení integrační složky regulátoru otáček.



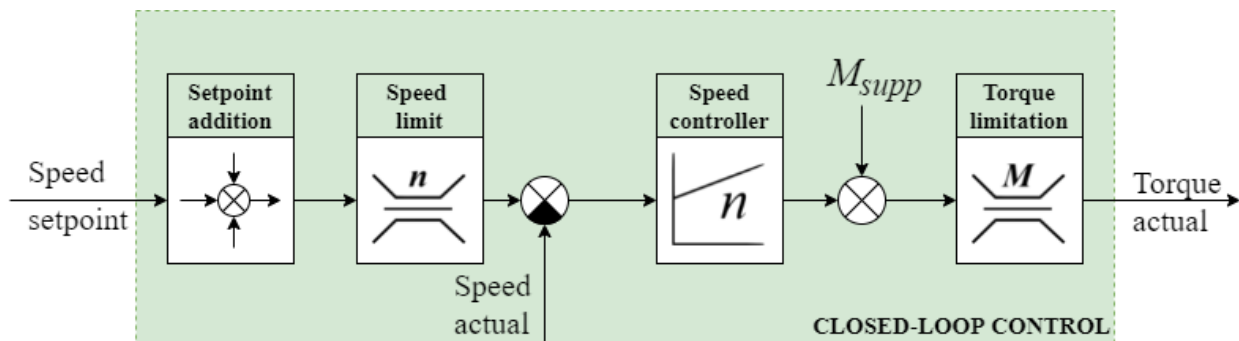
Obrázek 5.4: Přehledové blokové schéma měniče v režimu VECTOR

5.1.2 Koncepce měniče v režimu SERVO

Pro měnič v režimu SERVO platí přehledové výše uvedené schéma na obrázku 5.4 v případě, že je během konfigurace měniče zvolen funkční modul Extended setpoint channel. Pro účely práce tento modul nebyl zvolen, struktura kanálu žádané hodnoty je tedy odlišná (obrázek 5.6). Tato záležitost je blíže vysvětlena v kapitole 5.5.1.



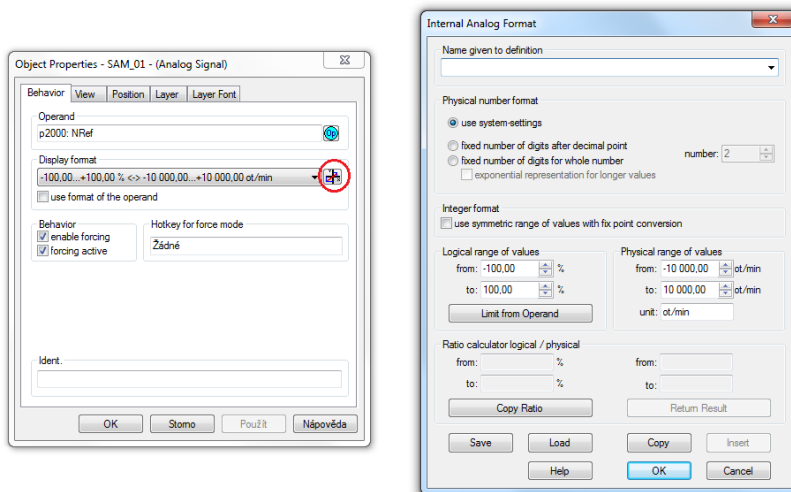
Obrázek 5.5: Drive navigator v režimu SERVO (SINAMICS S120)



Obrázek 5.6: Přehledové blokové schéma měniče v režimu SERVO

5.2 Zpracování analogových signálů w WinMOD

Zpracovávání analogových hodnot a veličin v WinMOD je prováděno primárně v procentech v rozsahu -100% až +100%. WinMOD však umožňuje zvolit i sekundární (fyzikální) rozsah hodnot, který může být uživatelem zadán dle potřeby. V rámci vytvářeného modelu jsou pro jednoduchost všechny analogové veličiny, zejména otáčky, momenty a časy, vztaženy na rozsah -10000 až 10000, odpovídající logickému rozsahu -100% až +100%.



Obrázek 5.7: Nastavení fyzikálního rozsahu u proměnné

5.3 Komunikace s PLC

Od digitálního dvojčete pohonu jsou požadovány vstupní a výstupní signály podle tzv. DSI (Drive system interface). DSI popisuje telegram pro cyklickou komunikaci s PLC po průmyslové sběrnici. Je uvažován podle standardu 10/10, v jednom komunikačním cyklu tedy měnič přijímá a vysílá deset 16-bitových slov (datový typ word). Každé z nich může být považováno za 16 binárních signálů nebo digitální signál reprezentující příslušnou analogovou veličinu.

5.3.1 DSI jednomotorového motoru s regulací otáček

Jedná se o regulovaný pohon pro jednoduché aplikace. Stejně DSI je v tomto případě používáno jak pro měniče S120, tak G120.

Tabulka 5.1: DSI pohonu pro jednoduché aplikace

PZD	Vstupní signály	Přiřazené parametry	PZD	Vstupní signály	Přiřazené parametry
PZD1	CW1		PZD1	SW1	
PZD2	Nsetp [%]	p1070	PZD2	Nact [%]	r63
PZD3	Mlim setp [%]	p1522,1523	PZD3	Mact [%]	r80
PZD4	spare		PZD4	spare	
PZD5	spare		PZD5	spare	
PZD6	spare		PZD6	spare	
PZD7	spare		PZD7	spare	
PZD8	spare		PZD8	spare	
PZD9	spare		PZD9	spare	
PZD10	spare		PZD10	spare	

Význam signálů v tabulce 5.1:

- CW1 (Control word 1) - řídicí slovo, podrobně rozepsáno v tabulce 5.3.
- Nsetp (Speed setpoint) - žádaná hodnota otáček, v měniči vztahována k referenční hodnotě otáček uvedenou v parametru p2000 - Reference speed reference frequency.
- Mlim setp (Torque limit setpoint) - žádaná hodnota momentového limitu. Vztahováno k p2003 - Reference torque. U většiny pohonů je točivý moment limitován symetricky v obou polaritách, proto postačuje posílat kladnou hodnotu, která je pak v měniči přepočítána na hodnotu zápornou. **Měnič zde nesmí obdržet zápornou hodnotu!**
- SW1 (Status word 1) - Stavové slovo, podrobně rozepsáno v tabulce 5.3.
- Nact (Actual speed) - skutečná hodnota otáček, vztahováno k p2000.
- Mact (Actual torque) - skutečná hodnota točivého momentu, vztahováno k p2003.

5.3.2 DSI pohonu v Master-Slave konfiguraci

Kromě signálů již obsažených a popsanych v DSI jednoduchého pohonu v otáčkové regulaci obsahuje DSI pohonu v Master-Slave konfiguraci také další signály (tabulka 5.2).

Tabulka 5.2: DSI Master-Slave pohonu

PZD	Vstupní signály	Přiřazené parametry	PZD	Vstupní signály	Přiřazené parametry
PZD1	CW1		PZD1	SW1	
PZD2	Nsetp [%]	p1070	PZD2	Nact [%]	r63
PZD3	Mlim setp [%]	p1522,1523	PZD3	Mact [%]	r80
PZD4	CW2		PZD4	spare	
PZD5	Msetp from Master [%]		PZD5	spare	
PZD6	Load Share [%]		PZD6	Msetp for Slave [%]	
PZD7	spare		PZD7	spare	
PZD8	spare		PZD8	spare	
PZD9	spare		PZD9	spare	
PZD10	spare		PZD10	spare	

- Msetp from Master - žádaný moment z Master pohonu. Aktivní pouze ve Slave režimu.
- Load Share - koeficient sdílení zátěže. Pokud je roven 100%, rozdělí se zatížení mezi Master a Slave pohonem 1:1.
- Msetp for Slave - žádaný moment pro Slave pohon. Aktivní pouze v Master režimu.

5.3.3 Řídicí a stavová slova

Tabulka 5.3 popisuje význam binárních signálů řídicích a stavových slov.

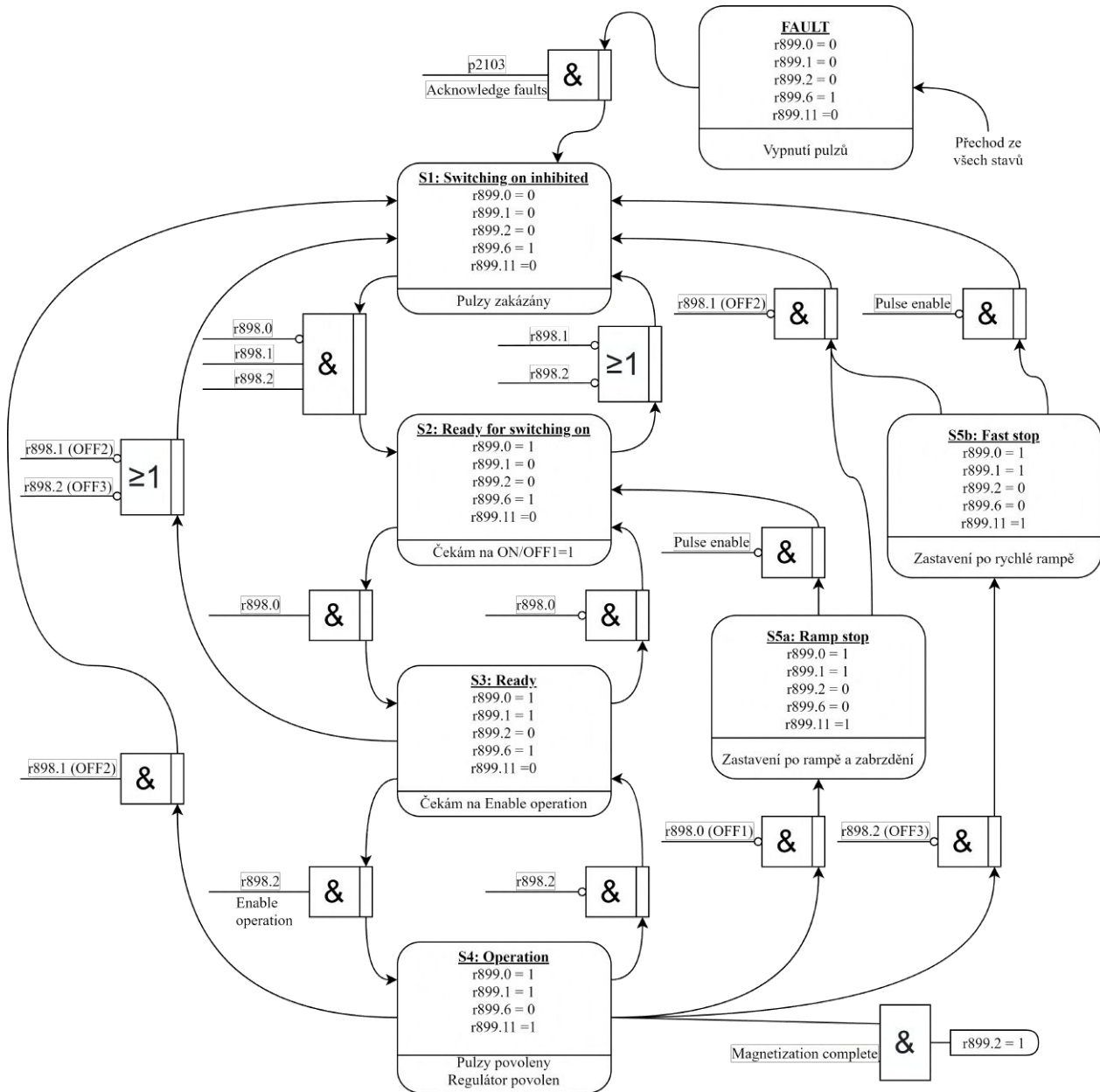
Tabulka 5.3: Význam signálů řídicího a stavového slova

Control word 1			Status word 1		
bit	Význam	Přiřazené parametry	bit	Význam	Přiřazené parametry
0	ON/OFF1	p840(r898.0)	0	Ready to switch on	r899.0
1	ON/OFF2	p844(r898.1)	1	Ready	r899.1
2	ON/OFF3	p848(r898.2)	2	Operation enabled	r899.2
3	Enable operation	p852(r898.3)	3	Fault active	r2139.3
4			4	No OFF2	r899.4
5			5	No OFF3	r899.5
6			6	Switching on inhibited	r899.6
7	Acknowledge faults	p2103	7		
8			8		
9			9		
10			10		
11			11	Pulses enabled	r899.11
12			12	Command open brake	r899.12
13			13	Torque limit reached	r1407.7
14			14		
15			15		

Control word 2		
bit	Význam	Přiřazené parametry
0	Unc. brake release	p855 (r898.7)
1	SUTP Enable	DCC
2	M/S mode	DCC
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		

5.4 Sekvencer

Sekvencer reprezentuje vnitřní řídicí logiku měniče. V podstatě se jedná o stavový automat, který přijímá bity řídicího slova (Control Word) a v závislosti na jejich stavu a sekvenci generuje bity stavového slova (Status Word) - tabulka 5.3. Funkce sekvenceru je zřejmá ze stavového diagramu na obrázku 5.8, který je zjednodušenou verzí diagramu č.2610 uvedeného ve [13]. Model sekvenceru pro digitální dvojčce v prostředí WinMOD je uveden na obrázku A.2 v příloze.



Obrázek 5.8: Stavový diagram sekvenceru [13]

Po zapnutí se pohon nachází ve stavu 1. Ve stavech 1 až 3 je regulační struktura neaktivní a setpoint zakázán. Při přechodu do stavu 4 jsou povoleny pulzy, a po magnetizaci (u asynchronních motorů) k povolení setpointu a rozjezdu motoru.

Zapnutí pohonu (přechod do stavu Operation))

- Signálem ON/OFF1 (r898.0) - nejčastěji využíváno
 - pokud jsou signály r898.1, r898.2 a r898.3 v log. 1
- Signálem Enable operation (r898.3)
 - pokud jsou signály r898.0, r898.1 a r898.2 v log. 1

Vypnutí pohonu (zastavení)

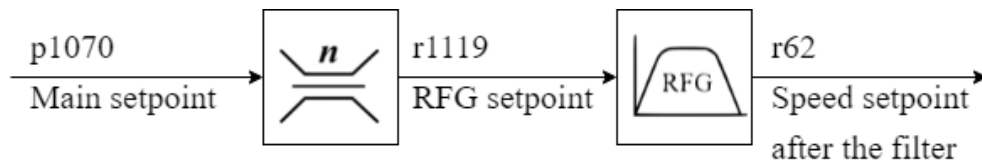
- Ramp stop (OFF1)
 - Pokud ve stavu Operation přejde ON/OFF1 (r898.0) do log. 0, motor se zastaví po nastavené rampě, blíže popsané v kapitole 5.5.1.2. Po poklesu otáček pod určitou nastavenou hodnotu přejde do logické nuly signál Pulse enable, který je vyhodnocován v bloku Brake Control. Pohon tak přejde do stavu 2 (Ready for switching on).
- Fast stop (OFF3)
 - Pokud ve stavu Operation přejde ON/OFF3 (r898.2) do log. 0, motor se zastaví po rychlé rampě, nastavené parametrem p1135. Po poklesu otáček pod určitou nastavenou hodnotu přejde do logické nuly signál Pulse enable a pohon přejde do stavu 1 (Switching on inhibited).
- Coast down (OFF2) - volný doběh
 - Pokud ve kterémkoli stavu přejde signál ON/OFF2 (r898.1) do log. 0, pulzy jsou zastaveny, měnič přejde do stavu 1 (Switching on inhibited) a motor dobíhá volně.
- Enable operation - volný doběh
 - Pokud ve stavu Operation přejde signál r899.3 do log. 0, pulzy jsou zastaveny, měnič přejde do stavu 3 (Ready) a motor dobíhá volně. [13] [15]

5.5 Kanál žádané hodnoty (Setpoint channel)

Jak již bylo uvedeno v předešlé kapitole, celkové uspořádání bloků režimu VECTOR a SERVO v otáčkové regulaci se liší právě v uspořádání kanálu žádané hodnoty (otáček).

5.5.1 Kanál žádané hodnoty v režimu VECTOR

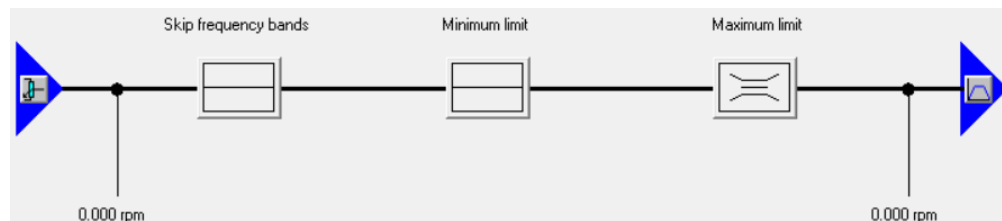
Do struktury měniče v režimu VECTOR vchází žádaná hodnota otáček jako hodnota parametru p1070. Ta je dále omezena v bloku omezení otáček a vedena do generátoru funkce rampy (RFG) v parametru r1119. Výstupní hodnota otáček z RFG (r62) pak slouží jako žádaná hodnota pro zpětnovazební regulační smyčku.



Obrázek 5.9: Kanál žádané hodnoty v režimu VECTOR

5.5.1.1 Omezení otáček

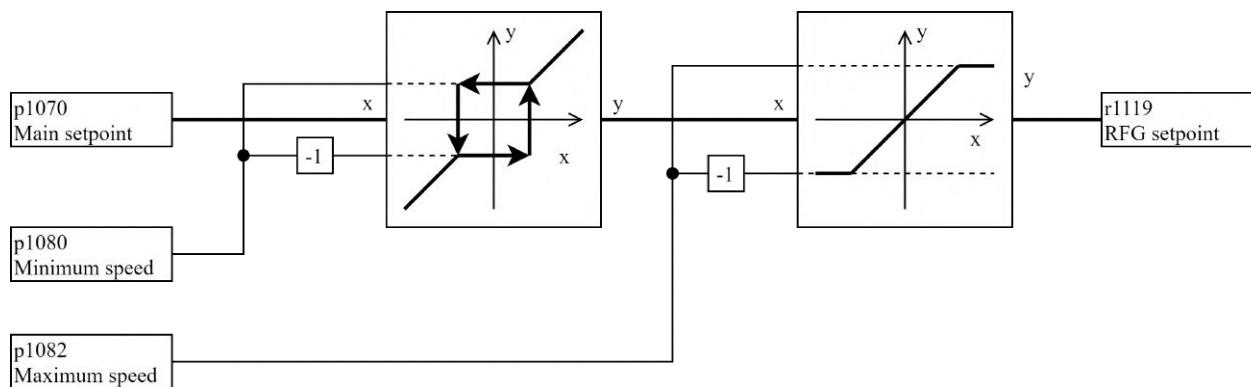
Blok sloužící pro dolní a horní omezení otáček. Je zjednodušenou variantou omezení otáček v prostředí SCOUT (obrázek 5.10).



Obrázek 5.10: Omezení otáček v prostředí SCOUT

Blok skip frequency bands slouží pro potlačení vibrací, zde tedy není potřebný. Zdroj limitů je pro jednoduchost omezen na jeden parametr pro dolní omezení a jeden parametr pro horní omezení (obrázek 5.11).

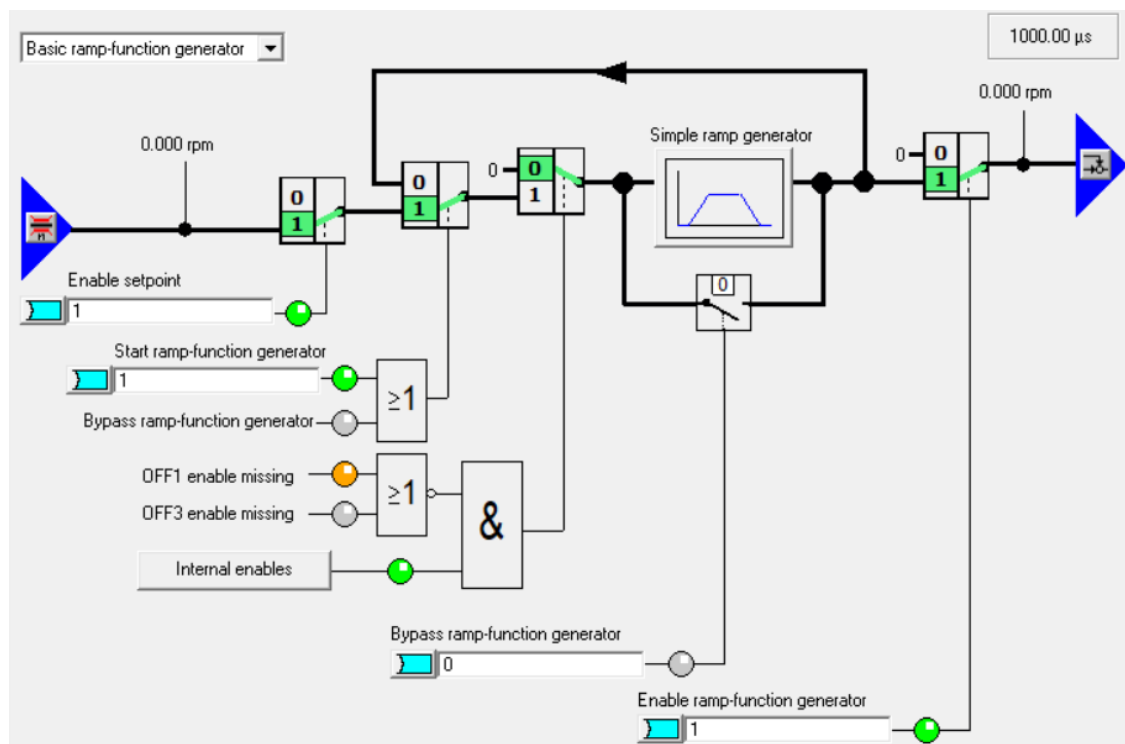
Funkce je založena na použití komparátorů, kompletní blok je zobrazen na obrázku A.3. Za zmínku zde stojí důležitost parametru (p1082), od něhož jsou odvozovány strmosti ramp v generátoru funkce rampy (kapitola 5.5.1.2). [15]



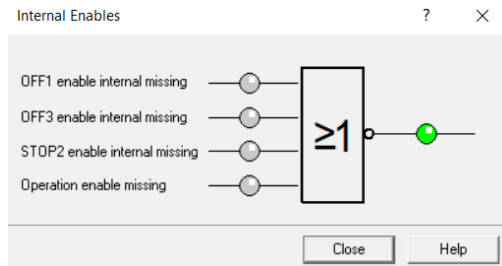
Obrázek 5.11: Blokové schéma omezení otáček pro implementaci do prostředí WinMOD

5.5.1.2 Generátor funkce rampy (Ramp function generator, RFG)

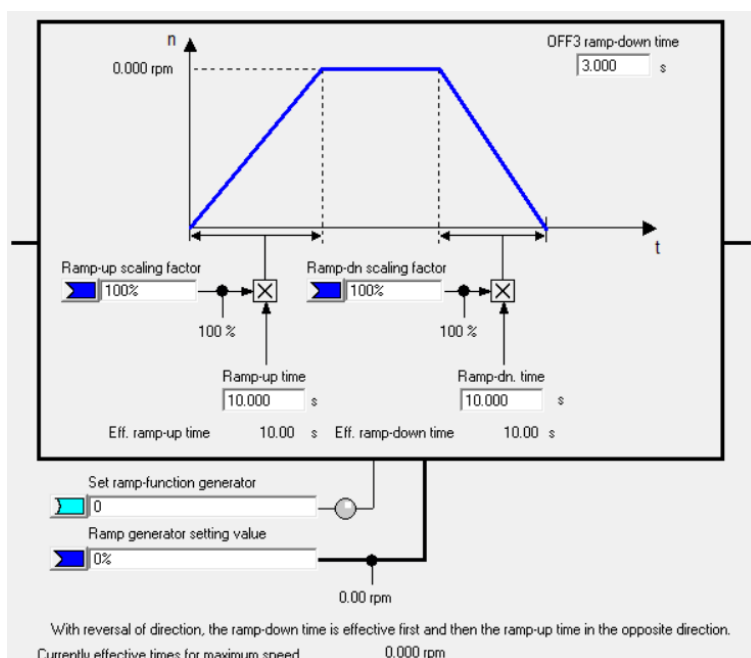
Generátor funkce rampy je používán zejména k omezení zrychlení v případě náhlé změny požadované hodnoty, což napomáhá předcházet mechanickým a elektrickým rázům v celém hnacím ústrojí. U měničů SINAMICS lze nastavit dva druhy rampového generátoru - základní (Basic, simple) a rozšířený (Extended). U rozšířeného lze navíc nastavovat zaokrouhlení ramp, což však pro tuto aplikaci není potřebné. Simulována je proto základní varianta.



Obrázek 5.12: Basic ramp function generator (Simotion SCOUT)



(a) Internal enables (Simotion SCOUT)

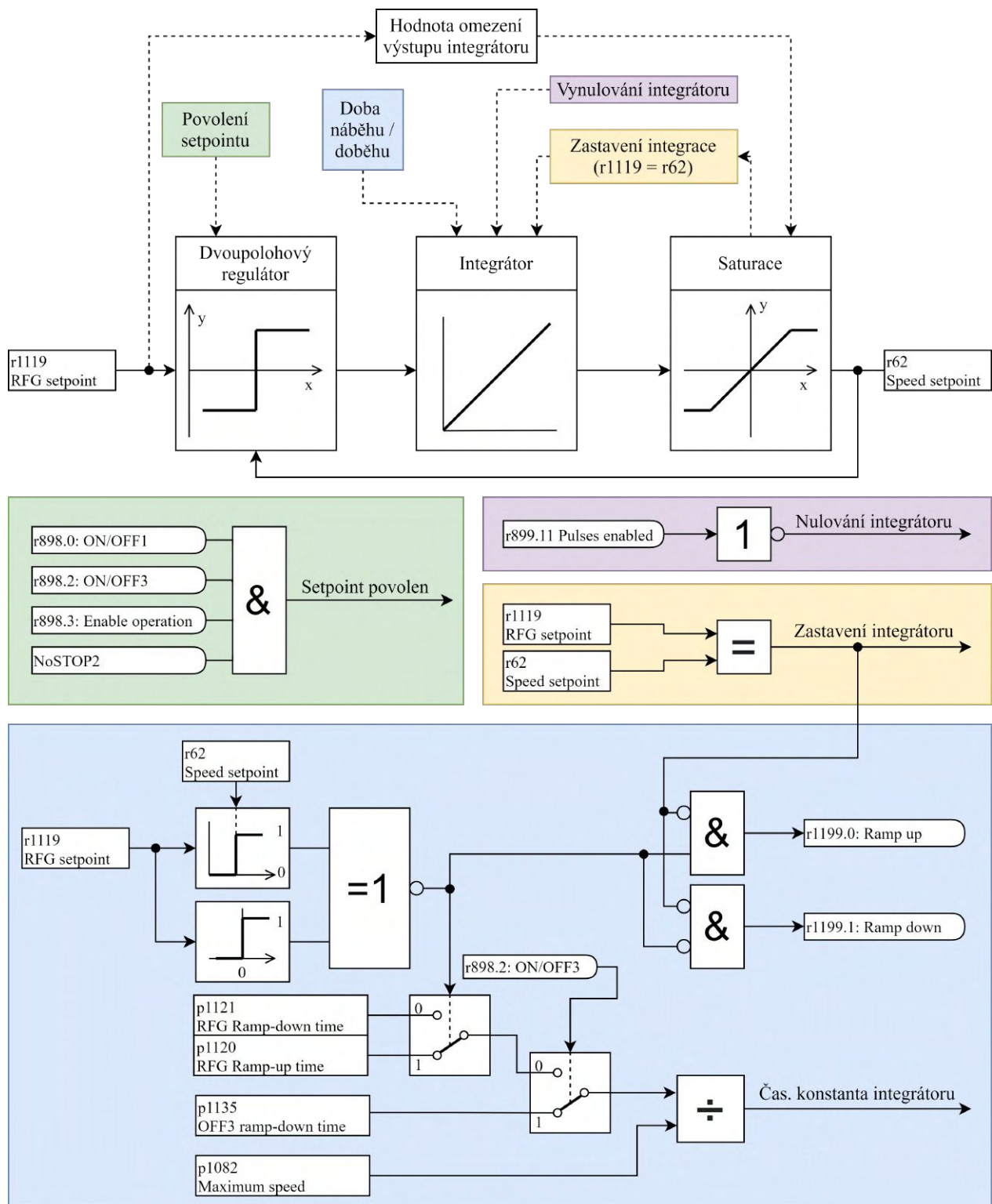


(b) Simple ramp generator (Simotion SCOUT)

Obrázek 5.13: Vnitřní nastavení RFG (Simotion SCOUT)

Dobu rozběhu (p1120) a doběhu (p1121) lze použít k nastavení rozběhové a doběhové rampy, což umožňuje řízený přechod v případě náhlé změny požadované hodnoty. Jako referenční pro výpočet dob rozběhových a doběhových ramp je použita hodnota parametru p1082 (viz kapitola 5.5.1.1. Pomocí p1135 lze nastavit speciální rampu určenou pro rychlé zastavení (OFF3), která se používá například jako reakce na stisknutí tlačítka nouzového zastavení [15].

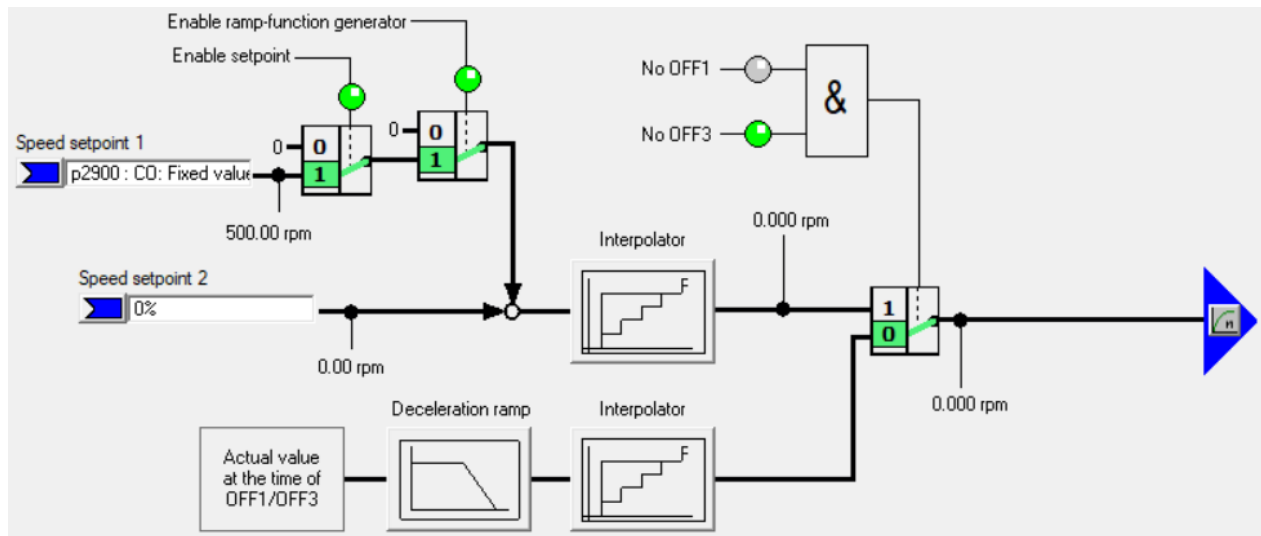
Podstata funkce rampového generátoru vychází z blokového schématu na obrázku 5.14 a diagramu [3060] v [13]. Blokové schéma je přímou předlohou pro realizaci modelu RFG v WinMOD. Jádrem je integrátor s omezením. Hodnotou omezení je v tomto případě vstupní hodnota žádaných otáček. Strmost ramp je vypočtena z maximální rychlosti (p1082) a zadané doby rozběhu (p1120) a doběhu (p1121). Výstupní signál generátoru je srovnáván se vstupním signálem ve dvoupolohovém regulátoru, jehož výstup je zároveň vstupem pro integrátor. Finální generátor rampy sestavený v prostředí WinMOD je na obrázku A.4 v příloze.



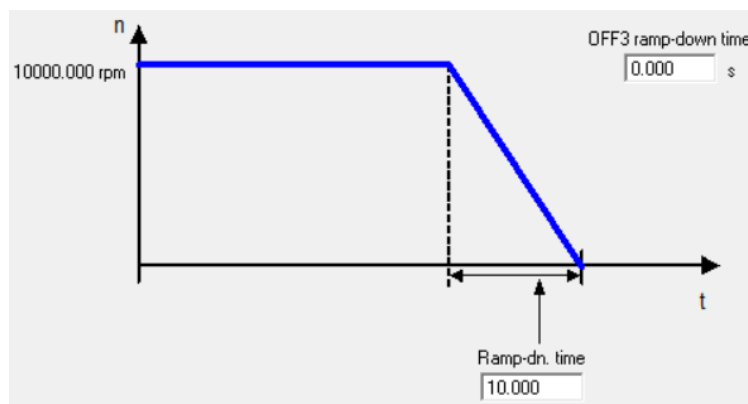
Obrázek 5.14: Blokové schéma RFG pro implementaci do WinMOD

5.5.2 Kanál žádané hodnoty v režimu SERVO

Základní (nerozšířený) kanál žádané hodnoty v režimu SERVO v prostředí Simotion SCOUT je uveden na obrázku 5.15. V prostředí SCOUT je zařazen jako součást zpětnovazební smyčky (záložka Closed-loop control). Výstup bloku Setpoint addition je dále veden do limiteru, jehož výstup je vstupem pro regulátor otáček.

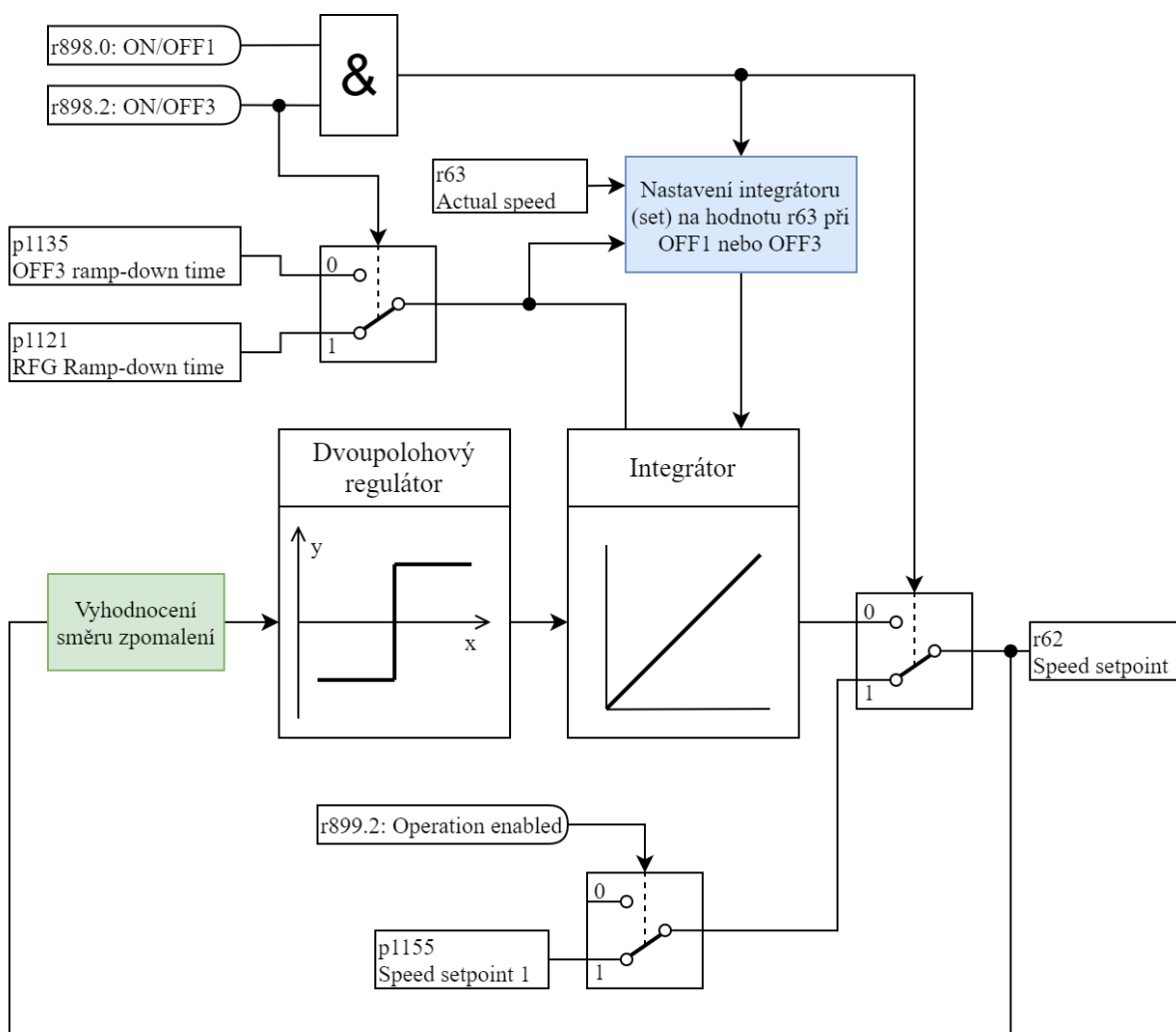


Obrázek 5.15: Základní setpoint channel v režimu SERVO (Simotion SCOUT)



Obrázek 5.16: Brzdná rampa v režimu SERVO (Simotion SCOUT)

Na obrázku 5.17 je znázorněno blokové schéma bloku Setpoint addition pro implementaci do prostředí WinMOD. Vstupem jsou žádané otáčky v parametru p1155: Speed setpoint 1. Při požadavku na zastavení (OFF1 nebo OFF3) je zdroj žádaných otáček přepnut na brzdnu rampu nastavenou, stejně jako v režimu VECTOR, parametry p1121(pro OFF1) a p1135(pro OFF3). Strmost ramp je odvozena od limitu otáček v parametru p1082: Maximum speed.



Obrázek 5.17: Setpoint addition - blokové schéma pro implementaci do WinMOD

5.6 Zpětnovazební regulační smyčka (Closed loop control)

Regulátor otáček přijímá požadovanou hodnotu otáček (`r0062`) z kanálu požadované hodnoty a její skutečnou hodnotu (`r0063`) ze snímače otáček. Zpracovává systémovou odchylku (`r0064`) a jeho výstupem je požadovaný točivý moment (`r1480`). Optimální nastavení regulátoru otáček lze určit pomocí automatické optimalizační funkce (`p1900`) [15].

Jelikož princip funkce regulátoru v měničích S120/G120 není na první pohled zřejmý a není podrobně popsán v dostupných manuálech, byla jeho vnitřní struktura identifikována experimentálně. Integrovaná složka byla vypnuta (`p1477 = 1`) a proporcionální složka nastavena na nízkou hodnotu ($K_p = 1$). Pohon byl rozběhnut na nízké otáčky a byly měřeny hodnoty systémové odchylky (`r0064`) a výstupního žádaného momentu regulátoru (`r1480`).

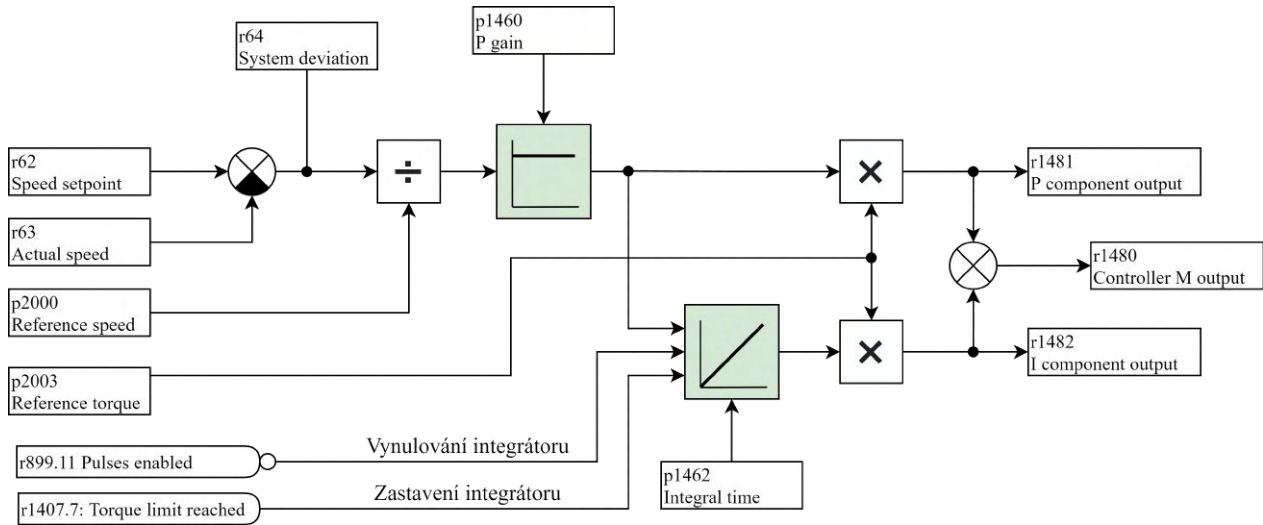
5.6.1 Regulátor otáček v režimu VECTOR

Pomocí výše uvedené metody bylo ověřeno, že vstupní a výstupní proměnné regulátoru v režimu VECTOR jsou vztahovány na referenční hodnoty otáček a momentů. Jeho přenos je

$$F_{R,VECTOR}(s) = \frac{M_{out}(s)}{n_{dev}(s)} = \frac{M_{ref}}{N_{ref}} \cdot K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{sT_i}\right) \quad (5.1)$$

$$= \frac{r1480(s)}{r64(s)} = \frac{p2003}{p2000} \cdot p1460 \cdot \left(1 + \frac{1}{s \cdot p1462}\right) \quad (5.2)$$

Pro implementaci do prostředí WinMOD bylo použito blokové schéma na obrázku 5.18. Regulátor v digitálním dvojčeti je zjednodušený, bez adaptace regulačních konstant a bez funkce Speed controller precontrol. Integrační složka je zastavována při dosažení momentového limitu, a vynulována negovanou hodnotou signálu Pulses enabled (r899.11), tedy ve stavech 1 až 3 (viz Sekvencer).



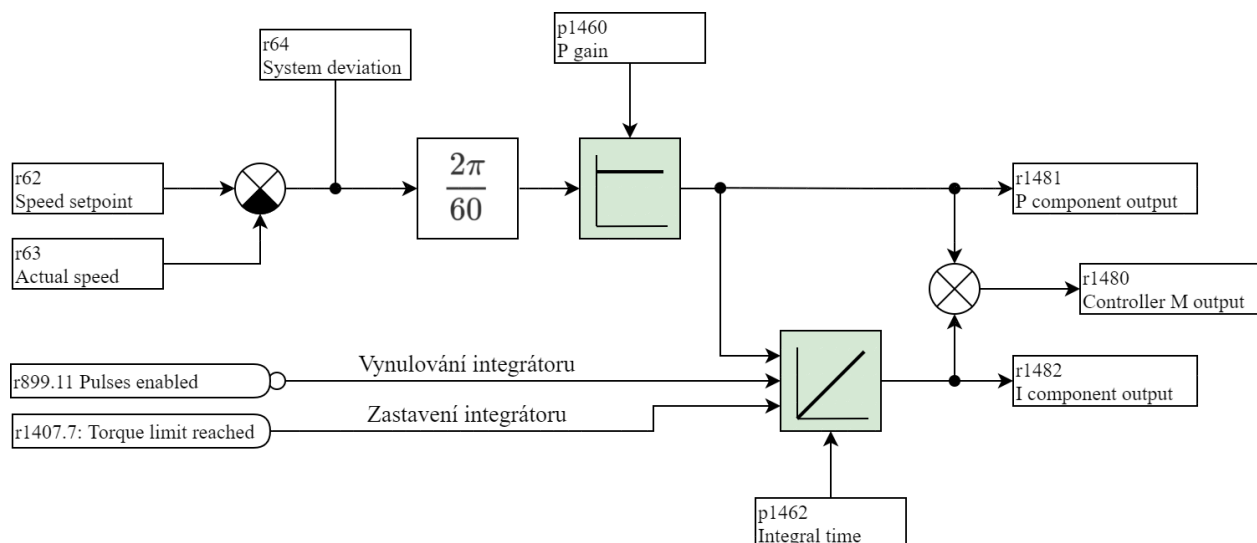
Obrázek 5.18: Blokové schéma regulátoru otáček v režimu VECTOR pro implementaci do WinMOD

5.6.2 Regulátor otáček v režimu SERVO

Blok regulátoru otáček v režimu se od bloku v režimu VECTOR liší tím, že místo vztahování na referenční hodnoty jsou otáčky pouze přepočítány na úhlový kmitočet. Přenos regulátoru v režimu SERVO je tedy

$$F_{R,SERVO} = \frac{M_{out}(s)}{n_{dev}(s)} = \frac{2\pi}{60} \cdot K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{sT_i}\right) \quad (5.3)$$

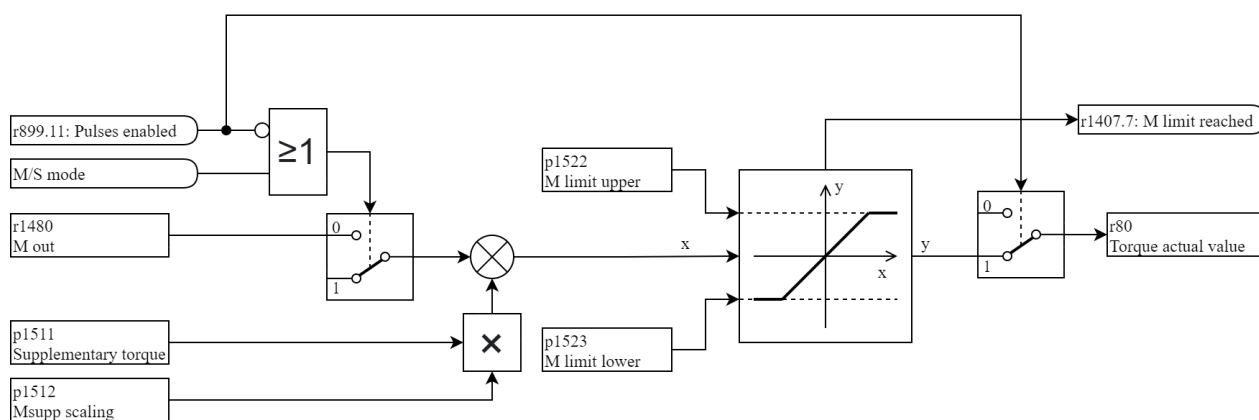
$$= \frac{r1480(s)}{r64(s)} = \frac{2\pi}{60} \cdot p1460 \cdot \left(1 + \frac{1}{s \cdot p1462}\right) \quad (5.4)$$



Obrázek 5.19: Blokové schéma regulátoru otáček v režimu SERVO pro implementaci do WinMOD

5.6.3 Dodatečné hodnoty a omezení momentu

Limitace momentu je provedena jednoduše pomocí komparátorů a multiplexerů, obdobně jako limitace otáček v podkapitole 5.5.1.1. Implementace do prostředí WinMOD na obrázku 5.20.



Obrázek 5.20: Blokové schéma dodatečných momentů a momentového limitu

Pokud výstupní moment z otáčkového regulátoru přesáhne limit nastavený v parametru p1522 nebo p1523, blok generuje signál r1407.7 - Torque limit reached, který je připojen na stavové slovo a je používán například k zastavování integrační složky regulátoru otáček.

Dodatečný moment daný násobkem parametrů p1511 a p1512 je používán, pokud je pohon ve Slave módu. V tom případě je na parametr p1511 připojen moment z Master pohonu, a na parametr p1512 koeficient sdílení zátěže (LoadShare).

5.7 Řízení brzdy

Blok řízení brzdy je potřebný i v případě, že simulovaný pohon nepoužívá či vůbec neobsahuje brzdou. Jeho funkcí je mimo jiné např. vyhodnocení zastavení pohonu či generování signálu Pulse enable a signálu NoSTOP2, který souvisí s magnetizací motoru.

Blokové schéma vychází přímo z diagramu č.2701 v [13]. K základu byly přidány tyto funkce:

- Logika respektující prioritu použitých parametrů v tomto pořadí (od nejvyšší priority k nejnížší): p1215, p858(r898.14), p855(r898.7), parametry sekvenceru
- Nastavení času magnetizace parametrem p346. Po příchodu signálu Pulse enable je spuštěn časovač. Po uplynutí doby nastavené v p346 je povolen signál NoSTOP2, který přímo odpovídá za povolení setpointu. V případě synchronních motorů nastavit $p346 = 0$.
- Výtahová brzda (Startup torque precontrol, SUTP) zamezující upadnutí zátěže při rozjezdu s aktivní zátěží. Pokud je signál SUTPactive = 1, dojde v okamžiku zabrzdění pohonu ($r899.13 = 1$) k zápisu okamžité hodnoty momentu (r80) pomocí 32b registru do proměnné StartupTorque. Při následném rozjezdu nebude brzda otevřena, dokud moment motoru (r80) nepřekročí hodnotu proměnné StartupTorque.

Implementace bloku do prostředí WinMOD je na obrázku A.8.

5.8 Vyhodnocení chybových stavů

Měniče SINAMICS obsahují značné množství chybových stavů a alarmů. Pro digitální dvojče byly pro simulaci vybrány následující případy spadnutí pohonu do stavu Fault:

- Umělé nastavení chyby (pokud $p2103 = 0$).
- Motor zablokován (Motor blocked).
- Motor zpomalován (Motor stalled).

Implementace do prostředí WinMOD vyplývá z funkčního diagramu č.8012 v [13] a je uvedena na obrázku A.9.

Kapitola 6

Ověření funkce digitálního dvojčete

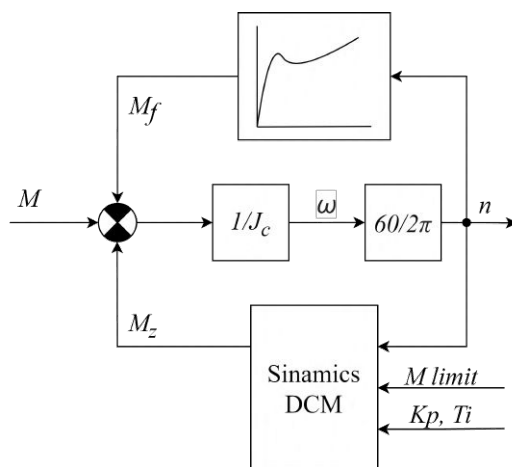
6.1 Model zátěže pro implementaci do WinMOD

Cílem této podkapitoly je modelovat zátěž používaných pohonů. Obecně je zátěž tvořena následujícími složkami:

- Momentem zátěže (zatěžovacího pohonu) - M_z
- Celkovým třecím momentem soustrojí - M_f
- Celkovým momentem setrvačnosti soustrojí - J_c

Spolu s hnacím momentem tvoří uvedené složky pohybovou rovnici

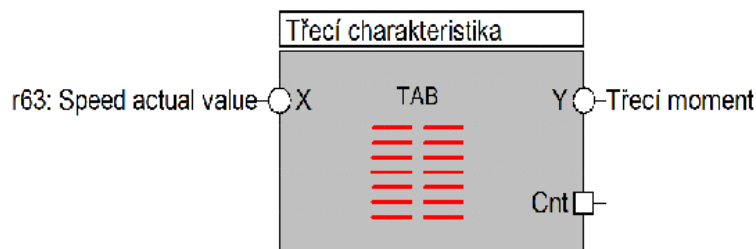
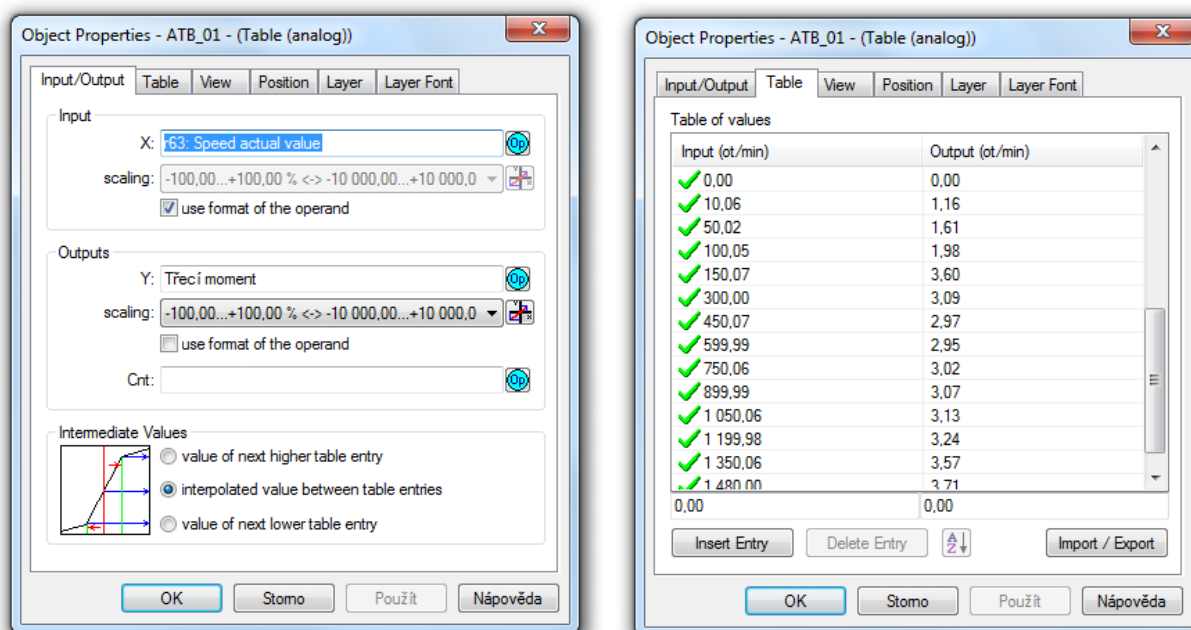
$$M - M_f - M_z = J_c \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (6.1)$$



Obrázek 6.1: Struktura zátěže pohonu

6.1.1 Model třecí charakteristiky

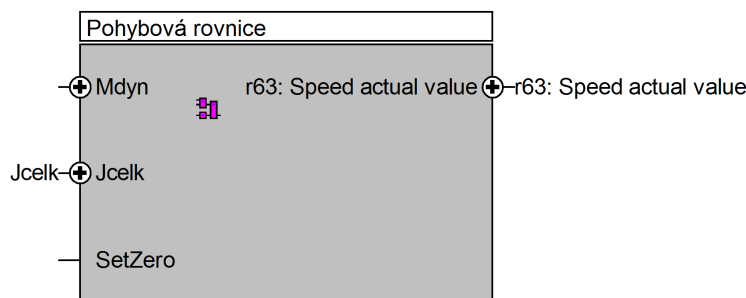
Třecí charakteristiky obou soustrojí (4.5b a 4.9) mají silně nelineární charakter. Při implementaci do WinMOD aproximace např. polynomem neposkytuje příliš uspokojivé výsledky co se týče přesnosti a je náročná z hlediska výpočtového výkonu. Zvoleným řešením je pro svoji jednoduchost interpolační tabulka (obrázek 6.2), která určuje bod na daném intervalu pomocí linearizace tohoto intervalu.



Obrázek 6.2: Interpolační tabulka a její nastavení v prostředí WinMOD

6.1.2 Pohybová rovnice

Pohybová rovnice je do WinMOD implementována jako blok, do něž vstupuje dynamický moment a zadaný moment setrvačnosti. Výstupem jsou skutečné otáčky soustrojí. Bit SetZero slouží k vynulování integrátoru, a v případě pohonu vybaveného brzdou je zde napojen invertovaný signál r899.12: Open holding brake. Vnitřek bloku je uveden v příloze na obrázku 6.3.

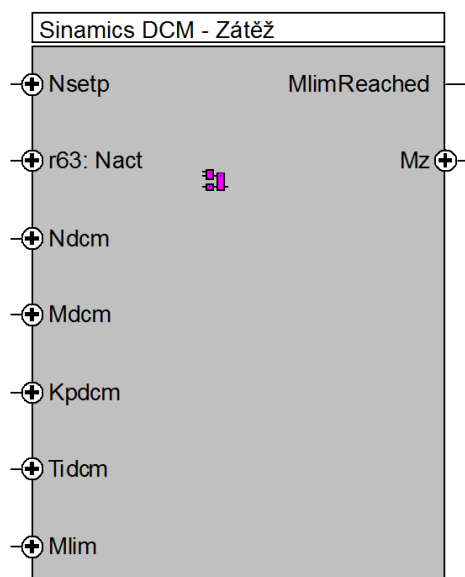


Obrázek 6.3: Pohybová rovnice v prostředí WinMOD

6.1.3 Model pohonu s měničem SINAMICS DCM

Pro testy jednomotorového pohonu byl vytvořen blok pohonu se stejnosměrným motorem a měničem DCM v prostředí WinMOD (obrázek 6.4). Blok uvnitř obsahuje pouze regulátor otáček a omezení momentu. Proměnné N_{dcm} a M_{dcm} slouží jako referenční hodnoty otáček a momentu. K_{pdcm} a T_{idcm} jsou konstanty regulátoru a M_{lim} nastavitelný momentový limit. Signál $MLimReached$, tedy dosažení momentového limitu, slouží pro zastavení integrační složky regulátoru.

Vnitřní struktura regulátoru byla identifikována stejným způsobem, jako je uvedeno v podkapitole 5.6 u měniče G120/S120 v režimu VECTOR, a funguje na shodném principu. Výpočet akčního zásahu je opět vztažen na referenční hodnoty otáček a momentu.



Obrázek 6.4: Blok měniče SINAMICS DCM v prostředí WinMOD

6.2 Testy jednomotorového pohonu v režimu VECTOR

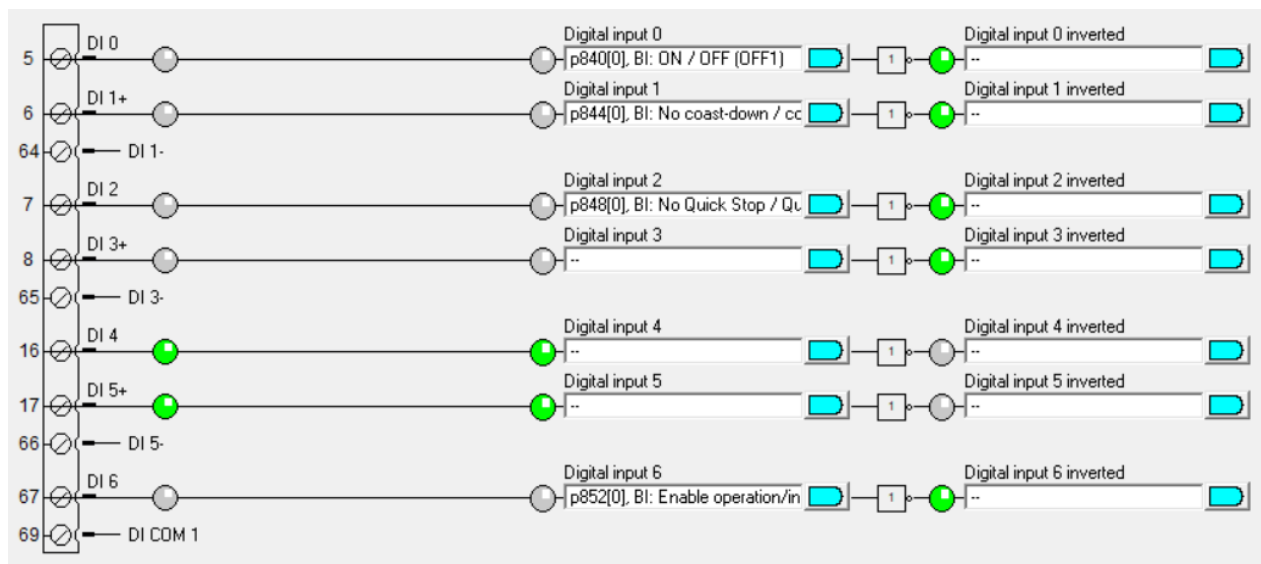
Ověření funkce digitálního dvojčete jednomotorového pohonu s měničem G120/S120 je rozděleno do dvou částí:

1. Testy správné funkce sekvenceru v prostředí WinMOD.
2. Testy správné funkce regulační struktury v prostředích WinMOD a Matlab-Simulink.

V následujících podkapitolách je vždy uvedeno nastavení reálného pracoviště a jemu odpovídající nastavení parametrů digitálního dvojčete. Testovací plocha pro provádění výše uvedených testů v prostředí WinMOD a v prostředí Matlab-Simulink jsou v příloze na obrázcích B.1 a B.2.

6.2.1 Testy chování sekvenceru v režimu VECTOR

Pro potřeby ověření funkce sekvenceru byl měnič G120 řízen pomocí ovládacího panelu připojeného na jeho digitální vstupy. Signály z digitálních vstupů byly napojeny na základní bity řídicího slova (Control Word 1) dle obrázku 6.5.



Obrázek 6.5: Nastavení digitálních vstupů pro ovládání bitů řídicího slova

Seznam testů sekvenceru v režimu VECTOR:

1. Zapnutí a vypnutí signálem Enable operation - volný doběh. (B.3)
2. Zapnutí a vypnutí signálem ON/OFF1. (B.5)
 - Nejčastěji využíváno.

3. Zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF2 - volný doběh.  Zapnutí signálem ON/OFF1

4. 5. Rychlé zastavení.

Zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF1 a přechod do OFF3. (B.11)

Zapnutí signálem ON/OFF1, simulace poruchy - volný doběh. (B.13)

- Omylem byl pro potvrzení chyby (Acknowledge faults) použit jiný parametr, než je uveden v grafu. Jeho vliv je nicméně zřejmý z chování signálu Fault present.

6.2.2 Testy regulační struktury a zátěže pohonu v režimu VECTOR

Testy regulační struktury byly provedeny ověřením reakce hnacího pohonu (G120) na skokovou změnu zátěže pro různá nastavení regulátoru. Hnací pohon byl ovládán z Control Panelu programu Simotion SCOUT a zatěžovací pohon (DCM) z řídicího panelu napojeného na jeho digitální vstupní porty. Zatěžovací pohon byl regulován na hodnotu 0 ot/min s přepínatelným momentovým limitem 5/25 Nm. Postup měření byl následující:

1. Nabuzení stejnosměrného motoru.
2. Spuštění stejnosměrného motoru s limitem 5 Nm.
3. Spuštění a rozjezd asynchronního motoru na 1000 ot/min po rozběhové rampě.
4. Přepnutí momentového limitu DCM na 25 Nm.
5. Po doznění přechodného děje zastavení po doběhové rampě.

Na konci bylo také provedeno speciální měření s dosažením momentového limitu hnacího pohonu. Postup byl stejný jako je uvedeno výše, avšak při skokovém zvýšení momentového limitu DCM měl zatěžovací pohon vyšší moment než pohon hnací, což vedlo k zastavení soustrojí.

Nastavení a napojení důležitých parametrů obou měničů je shrnuto v tabulkách 6.1 a 6.2. Regulační konstanty obou pohonů byly získány automatickou optimalizací ($p_{340} = 1$).

Používaná testovací plocha v prostředí WinMOD je uvedena na obrázku B.1. Pro potřeby ověření funkce regulační struktury a zátěže byl vytvořen také model v prostředí Matlab-Simulink (obrázek B.2). Hlavním důvodem je mnohem výhodnější zobrazování časových průběhů, včetně užitečných funkcí jako např. Peak finder.

Tabulka 6.1: Parametry hnacího pohonu (SINAMICS G120)

Parametr	Význam	Hodnota
p1070	Žádané otáčky	1000 ot/min
p1082	Horní limit otáček	1000 ot/min
p1120	Doba rozběhové rampy	2 s
p1121	Doba doběhové rampy	2 s
p1460	Zesílení K_p regulátoru	5,097
p1462	Integrační konstanta T_i regulátoru	121,21 ms
p1522	Horní limit momentu	35,49 Nm
p1523	Dolní limit momentu	-35,49 Nm
p2000	Referenční hodnota otáček	1480 ot/min
p2003	Referenční hodnota momentu	35,49 Nm

Tabulka 6.2: Parametry zatěžovacího pohonu (SINAMICS DCM)

Parametr	Význam	Hodnota/napojení
p840	ON/OFF1	r53010.2 - DI1
p852	Enable operation	r53010.4 - DI2
p2000	Referenční hodnota otáček	1520 ot/min
p2003	Referenční hodnota momentu	47,12 Nm
p50083	Volba kanálu žádaných otáček	4
p50180	Momentový limit 1	5 Nm
p50182	Momentový limit 2	25 Nm
p50550	Zesílení K_p regulátoru	3,34
p50554	Integrační konstanta T_i regulátoru	144,09 ms
p50609	Žádané otáčky	0 %
p50694	Volba momentového limitu	r53010.0 - DI0

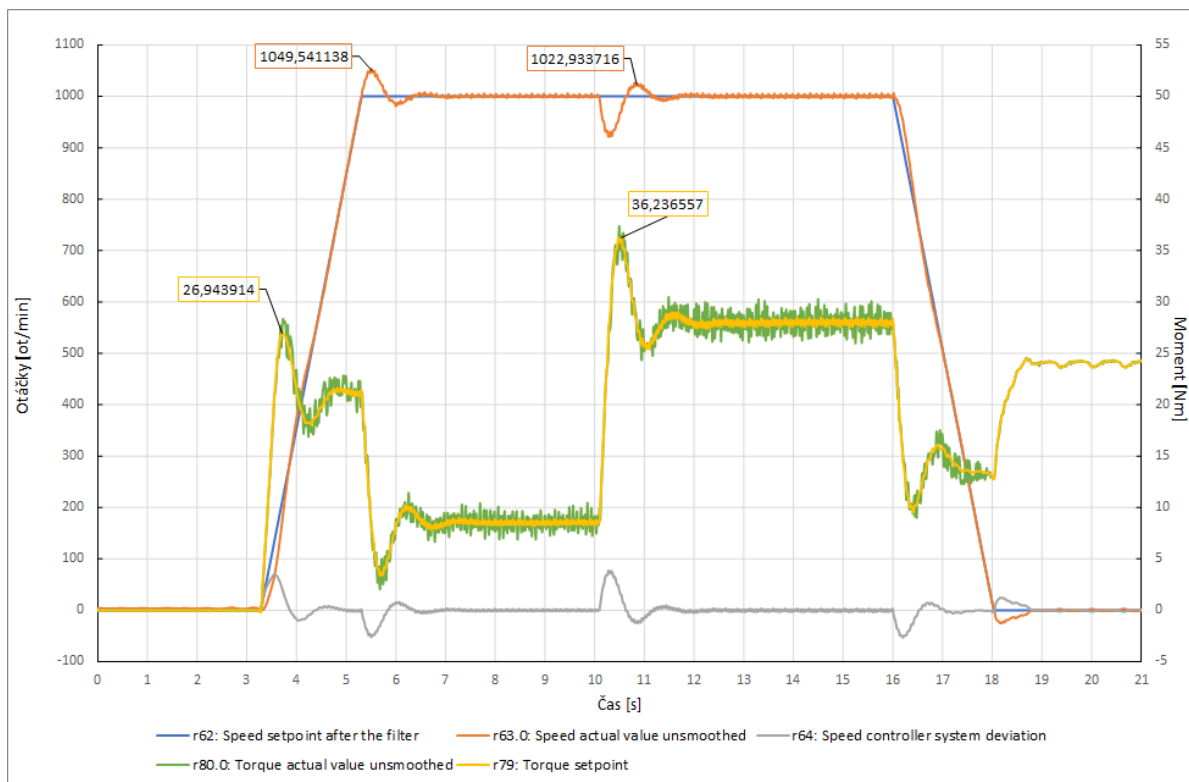
Seznam provedených testů s odkazy na přílohu:

1. Skoková změna zátěže pro nastavení regulátoru:

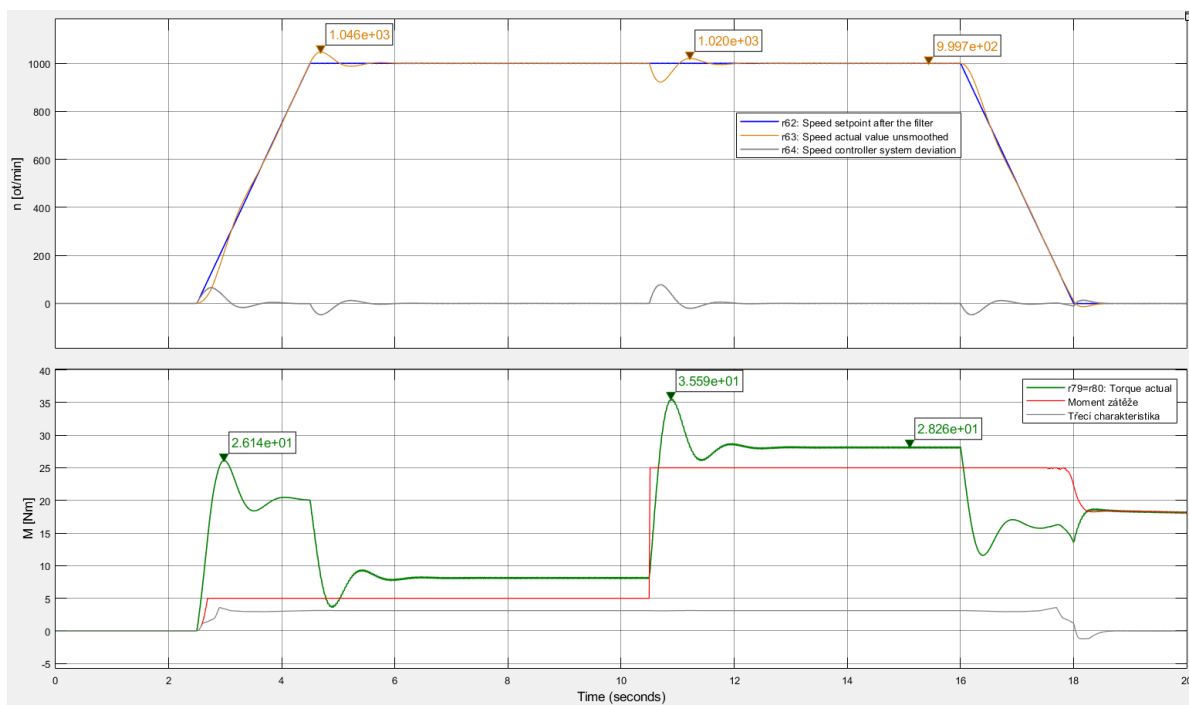
- (a) Pomalé: $K_p/2 = 2,5485$; $T_i/2 = 60,61$ ms (obrázky B.15, B.16 a B.17)
- (b) Optimální: $K_p = 5,097$; $T_i = 121,21$ ms (obrázky 6.6, 6.7 a 6.8)
- (c) Rychlé: $2K_p = 10,194$; $2T_i = 242,42$ ms (obrázky B.18, B.19 a B.20)

2. Dosažení momentového limitu hnacího pohonu (obrázky B.21, B.22 a B.23)

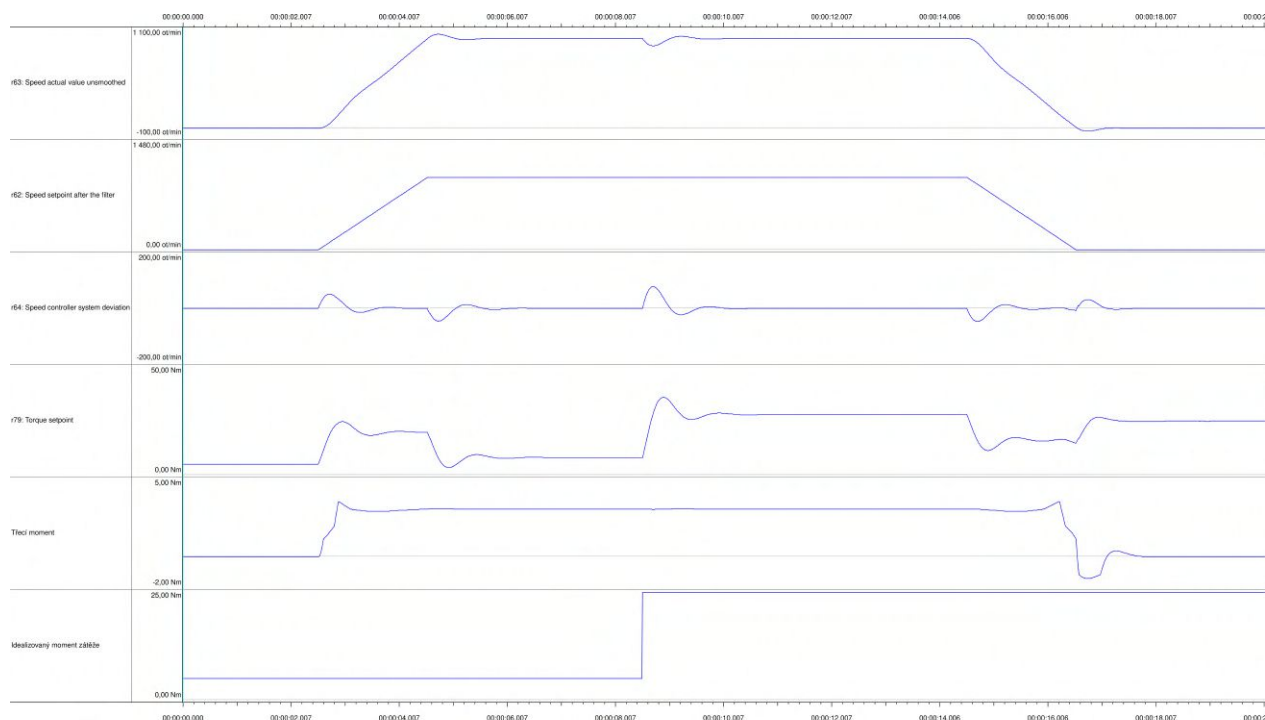
Jako příklad jsou níže uvedeny výsledky testů s optimálním nastavením regulátoru, provedených na reálném soustrojí a v prostředích WinMOD a Matlab-Simulink. Srovnání kvality regulace je uvedeno v tabulce 6.3. Ostatní testy jednomotorového pohonu v režimu VECTOR jsou uvedeny v příloze B.



Obrázek 6.6: SINAMICS G120 - skok zátěže, optimální nastavení regulátoru



Obrázek 6.7: Simulink - skok zátěže, optimální nastavení regulátoru



Obrázek 6.8: WinMOD - skok zátěže, optimální nastavení regulátoru

Tabulka 6.3: Srovnání kvality regulace z testu jednomotorového pohonu s optimálním nastavením regulátoru

Parametr kvality regulace	Změřeno	Simulink	WinMOD
Překmit otáček při rozběhu	4,95 %	4,60 %	4,70 %
Podkmit otáček během skoku zátěže	-7,86 %	-7,82 %	-8,13 %
Překmit otáček po skoku zátěže	2,29 %	2,00 %	2,37 %
Doba regulace během skoku zátěže	1,63 s	1,63 s	1,55 s
Špička momentu během rozběhu	26,94 Nm	26,14 Nm	24,80 Nm
Špička momentu během skoku zátěže	36,24 Nm	35,59 Nm	36,10 Nm
Ustálený moment při zátěži 5 Nm	8,24 Nm	8,10 Nm	8,11 Nm
Ustálený moment při zátěži 25 Nm	27,81 Nm	28,10 Nm	28,11 Nm

Překmit (podkmit) otáček v procentech je stanoven jako rozdíl maximální výchylky n_{max} a ustálené hodnoty otáček (považujeme za rovnou žádané hodnotě otáček n_{setp}), vztažen na hodnotu ustálených otáček:

$$\sigma = \frac{n_{max} - n_{setp}}{n_{setp}} \cdot 100 = \frac{1049,5 - 1000}{1000} \cdot 100 = 4,95 \% \quad (6.2)$$

Tabulka 6.4: Absolutní a relativní odchylky parametrů kvality regulace jednomotorového pohonu získané v prostředích Simulink a WinMOD od výsledků získaných experimentálně

Parametr kvality regulace	Simulink		WinMOD	
	Δ_{abs}	δ_r	Δ_{abs}	δ_r
Překmit otáček při rozběhu	0,35 %	7,07 %	0,25 %	5,05 %
Podkmit otáček během skoku zátěže	-0,04 %	0,51 %	0,27 %	-3,44 %
Překmit otáček po skoku zátěže	0,29 %	12,66 %	-0,08 %	3,49 %
Doba regulace během skoku zátěže	0,00 %	0,00 %	0,08 s	4,91 %
Špička momentu během rozběhu	0,80 Nm	2,97 %	2,14 Nm	7,94 %
Špička momentu během skoku zátěže	0,65 Nm	1,79 %	0,14 Nm	1,79 %
Ustálený moment při zátěži 5 Nm	0,14 Nm	1,70 %	0,13 Nm	0,39 %
Ustálený moment při zátěži 25 Nm	-0,29 Nm	-1,04 %	-0,30 Nm	-1,08 %

Výpočet absolutní odchylky překmitu σ_{sim} při rozběhu v prostředí Matlab-Simulink od experimentálně získané hodnoty $\sigma_{měř}$:

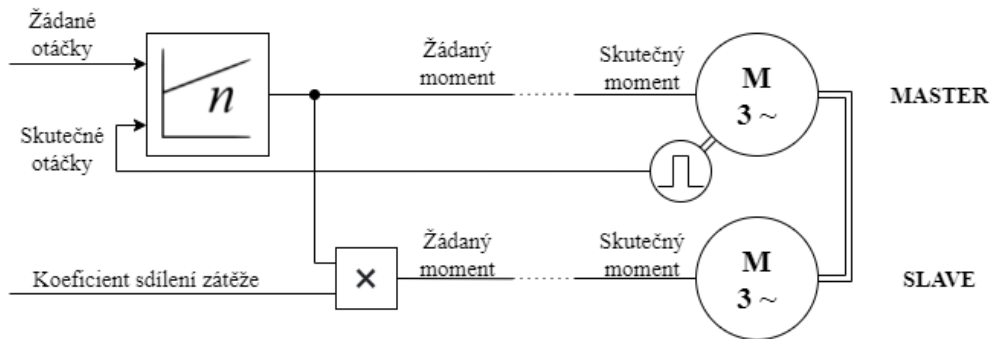
$$\Delta_{abs} = \sigma_{měř} - \sigma_{sim} = 4,95 - 4,6 = 0,35 \% \quad (6.3)$$

Výpočet relativní odchylky:

$$\delta_r = \frac{\Delta_{abs}}{\sigma_{měř}} \cdot 100 = \frac{0,35}{4,95} \cdot 100 = 7,07 \% \quad (6.4)$$

6.3 Testy pohonu v režimu SERVO a konfiguraci Master-Slave

Konfigurací Master-Slave rozumíme regulační vyrovnávání zátěže u pohonů s dvěma nebo více pohony. Uspořádání systému Master-Slave je uvedeno na obrázku 6.9. Regulátorem otáček je zde vybaven pouze hlavní (Master) pohon, u ostatních je předpokládáno řízení momentu. Pokud dojde k nerovnoměrnosti zatížení, každý pohon se s tím vyrovnává samostatně [16].



Obrázek 6.9: Master-Slave uspořádání dvoumotorového pohonu [16]

Ověření funkce digitálního dvojčete je opět rozděleno na testy funkce sekvenceru a testy funkce regulační struktury a zátěže.

6.3.1 Testy chování sekvenceru v režimu SERVO

Tak jak již bylo popsáno v podkapitole (6.2), zde byl pohon znovu řízen pomocí ovládacího panelu připojeného na bity řídicího slova přes digitální vstupy měniče.

Seznam testů sekvenceru v režimu SERVO:

1. Zapnutí signálem Enable operation, vypnutí signálem ON/OFF1 (obrázky C.3 a C.4).
 - Doběh po rampě, zabrzdění.
2. Zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí signálem Enable operation (obrázky C.5 a C.6).
 - Po vypnutí pulzů okamžité zabrzdění.
3. Zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF3 (obrázky C.7 a C.8).
 - Rychlé zastavení, zabrzdění.
4. Zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF1 a přechod do OFF3 (obrázky C.11 a C.12).
5. Zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF2 (obrázky C.9 a C.10).

6.3.2 Testy regulační struktury a zátěže pohonu v režimu SERVO

Testy měly za cíl ověřit a srovnat vzájemné ovlivňování bloků Master a Slave pohonů s chováním soustrojí popsaného v 4.2. Jelikož byly použité pohony řízeny pomocí stejné řídicí jednotky pomocí sběrnice DRIVE-CLIQ, propojení regulačních struktur se dalo jednoduše provést propojením jednotlivých parametrů.

Pohon Master byl nastaven v otáčkové regulaci. Jeho výstupní žádaný moment ($r79$) byl omezen na 0,5 Nm a byl připojen k parametru $p1511$ pohonu Slave jako dodatečný moment. Parametr $p1512$ byl použit jako koeficient sdílení zátěže, neboli Load Share (blíže popsáno v 5.6.3). Master i Slave byly zapínány signálem ON/OFF1 připojeným na tentýž digitální vstup. Nastavení ostatních důležitých parametrů pohonů je v tabulce 6.5.

Na reálném soustrojí a pracovních plochách v prostředí WinMOD (C.1) a Matlab-Simulink (C.2) byly provedeny následující testy:

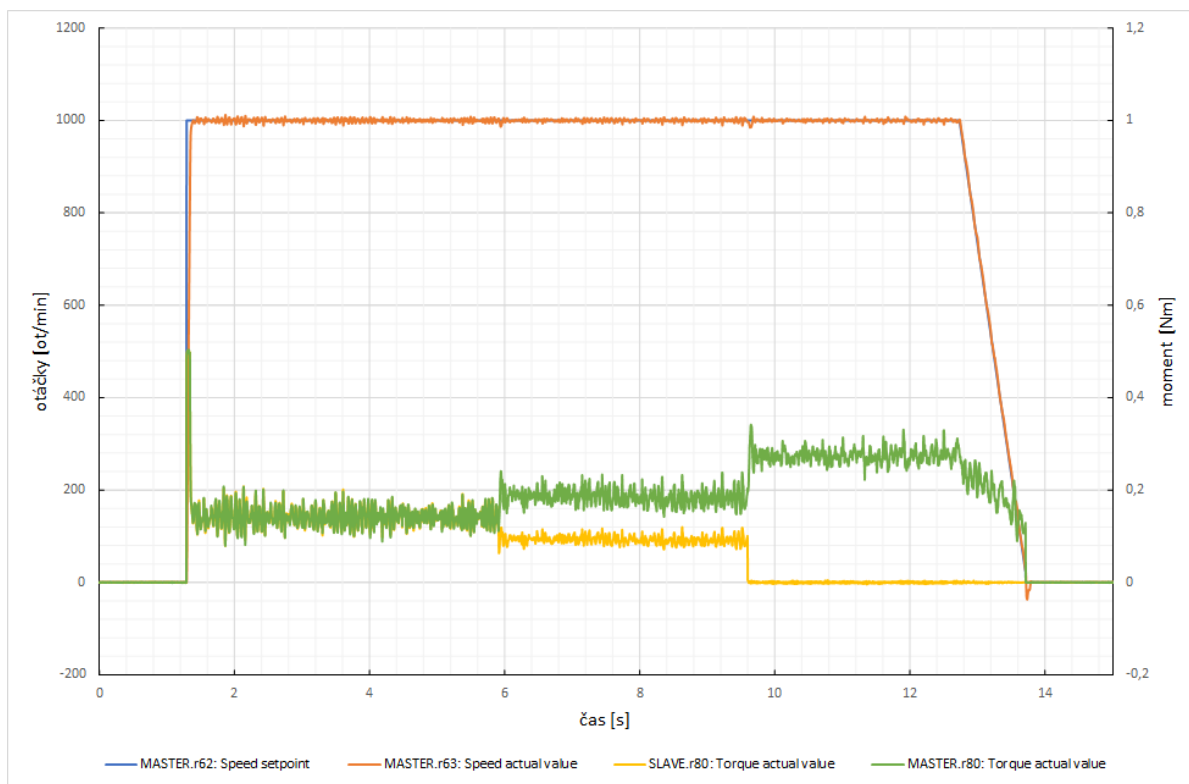
1. Rozběh na 1000 ot/min a doběh po rampě (obrázky C.13, C.15 a C.14)
2. Rozběh, změna Load Share 100-50-0%, doběh (obrázky 6.10, 6.11 a 6.12)

Tabulka 6.5: Nastavení parametrů Master,Slave a zatěžovacího pohonu

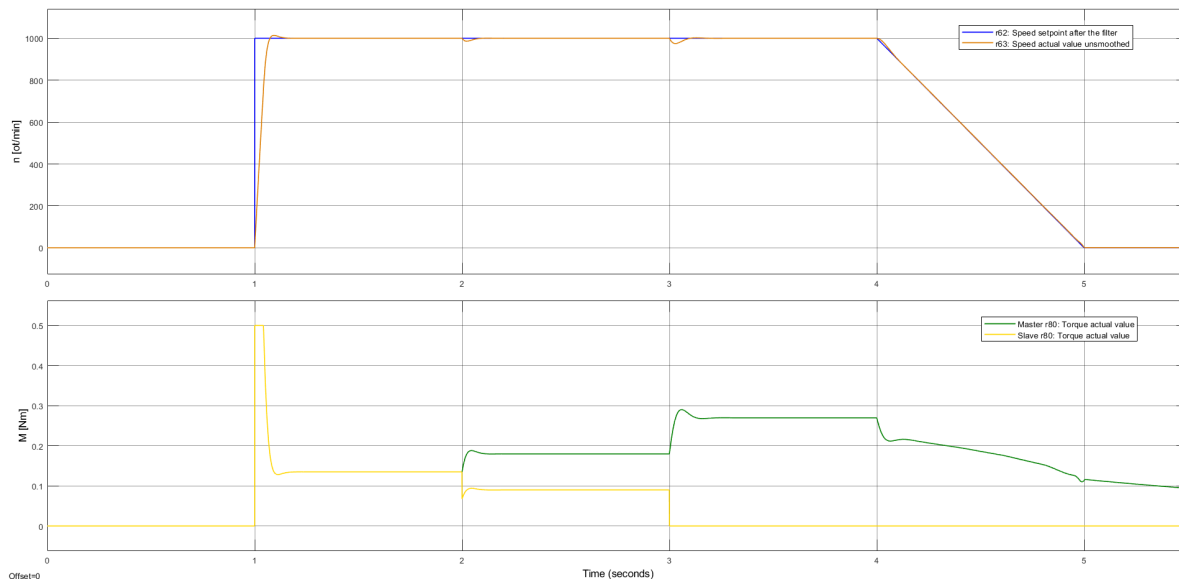
Parametr	Význam	Hodnota
p1155	Žádané otáčky	1000 ot/min
p1082	Horní limit otáček	10000 ot/min
p1121	Doba doběhové rampy	10 s
p1460	Zesílení Kp regulátoru	0,05
p1462	Integrační konstanta Ti regulátoru	30 ms
p1522	Horní limit momentu	0,5 Nm
p1523	Dolní limit momentu	-0,5 Nm
p2000	Referenční hodnota otáček	10000 ot/min
p2003	Referenční hodnota momentu	10000 Nm

3. Rozběh a postupný pokles momentového limitu pohonu Slave. Master postupně přebírá zátěž Slave pohonu. Doběh po rampě. (obrázky C.16, C.18 a C.17)
4. Rozběh a postupný pokles momentového limitu pohonu Master. Soustrojí se postupně zastaví. (obrázky C.19, C.21 a C.20)
5. Chyba pohonu Slave. (obrázky C.22, C.24 a C.23)
6. Chyba obou pohonů. (obrázky C.25, C.26)
7. Chyba pohonu Master. Slave se stává Mastrem, je přepnut do otáčkové regulace a přebírá celou zátěž. (obrázky C.27, C.29 a C.28)
8. Rozběh a doběh s aktivní zátěží bez výtahové brzdy. Rychlost snížena na 500 ot/min kvůli značnému vlivu prokluzu řemenových převodů. Při rozjezdu dojde k mírnému upadnutí zátěže. (obrázky C.30 a C.32)
9. Rozběh a doběh s aktivní zátěží a výtahovou brzdou. Upadnutí zátěže je zamezeno. (obrázky C.31 a C.32)

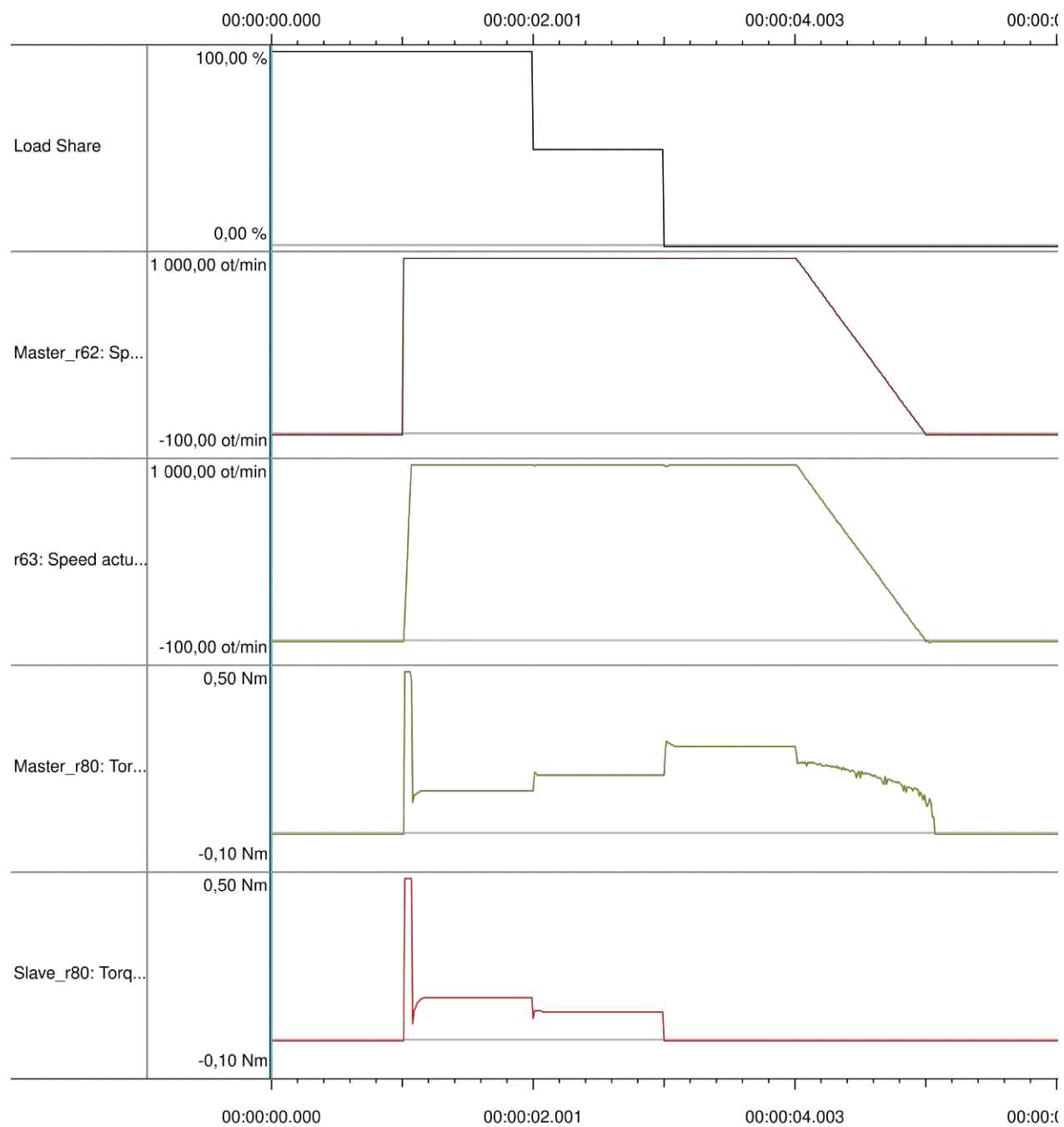
Jako názorný příklad pro srovnání kvality regulace jsou uvedeny výsledky testu č.2, tedy ověření vlivu změny koeficientu sdílení zátěže.



Obrázek 6.10: S120 - Rozběh, změna Load Share 100-50-0%, doběh.



Obrázek 6.11: Simulink - Rozběh, změna Load Share 100-50-0%, doběh



Obrázek 6.12: WinMOD - Rozběh, změna Load Share 100-50-0%, doběh

Tabulka 6.6: Srovnání kvality regulace z testu č.2 Master-Slave pohonu - změna koeficientu sdílení zátěže (LS)

Parametr kvality regulace	Změřeno	Simulink	WinMOD
Doba náběhu	88 ms	73,62 ms	70 ms
Podkmit otáček při 1. změně LS	1,34 %	1,39 %	1,13 %
Podkmit otáček při 2. změně LS	2,03 %	2,52 %	1,97 %
Špička momentu během 1. změny LS	0,22 Nm	0,19 Nm	0,19 Nm
Špička momentu během 2. změny LS	0,33 Nm	0,29 Nm	0,29 Nm

Tabulka 6.7: Absolutní a relativní odchylky parametrů kvality regulace Master-Slave pohonu získané v prostředích Simulink a WinMOD od výsledků získaných experimentálně

Parametr kvality regulace	Simulink		WinMOD	
	Δ_{abs}	δ_r	Δ_{abs}	δ_r
Doba náběhu	14,38 ms	16,34 %	21 ms	20,45 %
Podkmit otáček při 1. změně LS	-0,05 %	-3,73 %	0,53 %	15,67 %
Podkmit otáček při 2. změně LS	-0,49 %	-24,14 %	0,06 %	2,96 %
Špička momentu během 1. změny LS	0,03 Nm	13,64 %	0,03 Nm	13,64 %
Špička momentu během 2. změny LS	0,04 Nm	12,12 %	0,03 Nm	12,12 %

Kapitola 7

Závěr

V rámci diplomové práce byla nejprve rozebrána problematika virtuálního zprovoznění a digitálního dvojčete, jejich zařazení do životního cyklu produktu a opodstatnění zejména v průmyslové automatizaci.

V dalším kroce byla popsána předloha pro digitální dvojče měniče v podobě dvou reálných pracovišť: jednomotorový pohon s asynchronním motorem a měničem Sinamics G120 v režimu VECTOR a pohon v konfiguraci Master-Slave se synchronními motory s permanentními magnety a měničem Sinamics S120 v režimu SERVO. Tato část obsahuje informace o použitých komponentech, jejich nastavení a výsledky měření třech charakteristik a momentů setrvačnosti obou soustrojí.

Hlavní částí práce byla kapitola zabývající se tvorbou digitálního dvojčete měniče Sinamics. Na začátku je popsána zjednodušená regulační struktura aplikovaná ve tvořených modelech. Z reálné předlohy pro digitální dvojče dále vyplývá požadavek na tvorbu modelu v režimech VECTOR i SERVO, rozdíly mezi těmito režimy byly proto při tvorbě modelu respektovány. V jednotlivých podkapitolách jsou postupně rozebrány a popsány bloky obou modelů se zdůrazněním rozdílů mezi nimi. Podrobná struktura obou modelů je uvedena na obrázcích v příloze A.

Poslední kapitola popisuje průběh ověření funkce vytvořených modelů měničů Sinamics. Pomocí na začátku změřených charakteristik a parametrů obou soustrojí byla v digitálním prostředí rekonstruována jejich zátěž, která ve spojení s modely měničů tvoří pracovní plochy pro provádění potřebných testů. Tyto pracovní plochy byly pro srovnání vytvořeny jak v prostředí WinMOD, tak Matlab-Simulink.

Oba modely byly ověřeny nejdříve z hlediska funkce sekvenceru. Jejich reakce na řídicí signály poměrně přesně odpovídá chování reálných měničů. Seznamy provedených testů jsou uvedeny v kapitolách 6.2.1 a 6.3.1. Výsledky jsou uvedeny v příloze B a C.

Posledním krokem bylo ověření funkce regulační smyčky otáček digitálních dvojčat. Pro oba typy pohonů byly provedeny testy uvedeny v seznamech v podkapitolách 6.2.2 a 6.3.2.

Pro jednomotorový pohon v režimu VECTOR byl pro srovnání výsledků použit test s reakcí na skok zátěže z 5 na 25 Nm při optimálním nastavení regulátoru. Parametry kvality regulace

odečtené z měření na reálném soustrojí a simulací v prostředích WinMOD a Matlab-Simulink jsou seřazeny v tabulce 6.3. Absolutní a relativní odchylky simulačních výsledků jsou uvedeny v tabulce 6.4. Maximální relativní odchylka parametrů z prostředí Simulink činí 12,66%, z prostředí WinMOD 7,94%. Odchylky mohou být způsobeny chybami měření třecí charakteristiky a momentu setrvačnosti a zanedbáním regulační smyčky proudu v regulační struktuře.

Pro pohon v konfiguraci Master-Slave v režimu SERVO byl pro srovnání výsledků použit test se skokovou změnou koeficientu sdílení zátěže. Parametry kvality regulace jsou opět seřazeny v tabulce 6.6 a jejich odchylky v tabulce 6.7. Relativní odchylka dosahuje v prostředí Matlab-Simulink maximálně -24,14 % a v prostředí WinMOD 20,45 %. Výsledky testů jsou již méně uspokojivé, nicméně z velké části je to způsobeno použitými gumovými převody, kvůli kterým není vazba mezi jednotlivými pohony dokonale pevná a v mnohých případech to má za následek také značný prokluz pohonů či zátěže.

Ve výsledku lze vytvořené modely měniče Sinamics považovat za funkční a použitelné pro širokou škálu aplikací. Výzkum může pokračovat například rozšířením modelu SERVO o regulaci polohy (Basic positioner).

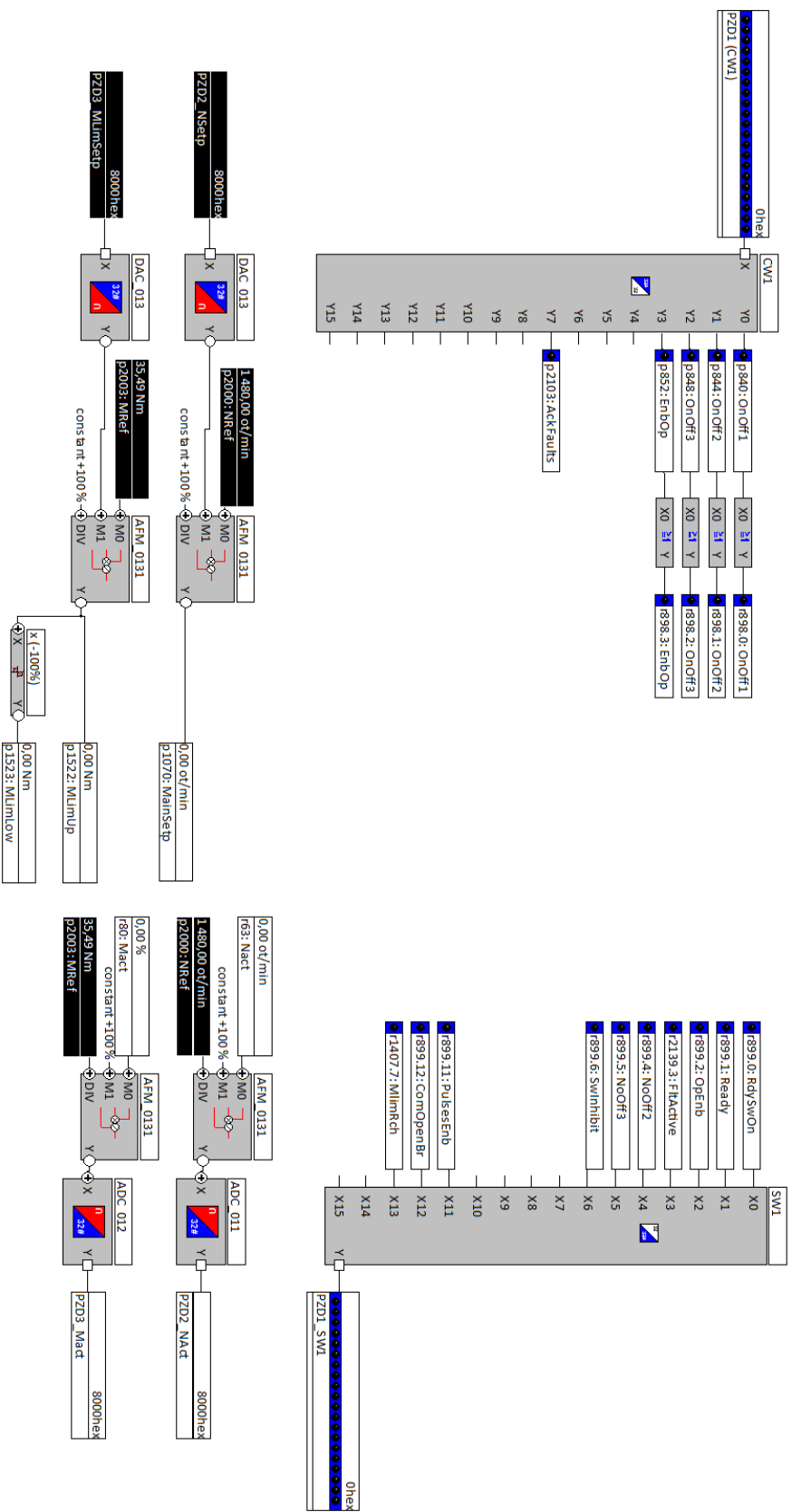
Literatura

1. HERLYN, Wilmjakob; ZADEK, Hartmut. Published in: Data science and innovation in supply chain management Mastering the Supply Chain by a Concept of a Digital Control- Twin. In: 2020-09. ISBN 80-7043-389-2. Dostupné z DOI: 10.15480/882.3120.
2. KOZIOREK, Jiří; KOCIÁN, Jiří; ŠTRBÍK, Ondřej; FAJKUS, Zdenek. *Prostředky průmyslové automatizace*. Ostrava: Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava, 2017.
3. *Sinamics S120 AC Drive Manual: Drive Manual*. ERLANGEN, Germany: Siemens AG Industry Sector - Drive technologies - Motion Control Systems, 2014.
4. *SINAMICS S120* [online] [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://www.adtec.cz/cz/pohony/sinamics-s120.php>.
5. *Sinamics Low Voltage Engineering Manual: SINAMICS G130, G150, S120 Chassis, S120 Cabinet Modules, S150*. NÜRNBERG, Germany: Siemens AG Industry Sector - Drive technologies - Motion Control Systems, 2020.
6. *SINAMICS S120 drive system: Overview* [online] [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/ww/catalog/products/10030361>.
7. *Virtuální zprovoznění – budoucnost průmyslu* [online] [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://virtualnivyroba.cz/project/virtualni-zprovozneni-budoucnost-prumyslu/>.
8. PODRAPSKÝ, Jan; KOZÁK, Martin. *Virtuální zprovoznění / Digitální dvojče: Siemens Drives Days 2019*. SIEMENS s.r.o. Praha, 2019. Dostupné také z: www.siemens.cz/pohony.
9. *WinMOD: for virtual commissioning - and more!* [Online] [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: winmod.de.
10. *Simulink Desktop Real-Time: Run Simulink models in real time on your computer* [online] [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/simulink-desktop-real-time.html>.
11. *Mechatronic concept designer: Multi-disciplinary approach to machine design* [online] [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://www.ued.co.uk/manufacturers/siemens/industrial-software-/virtual-commissioning-for-machine-builders/mechatronic-concept-designer/>.

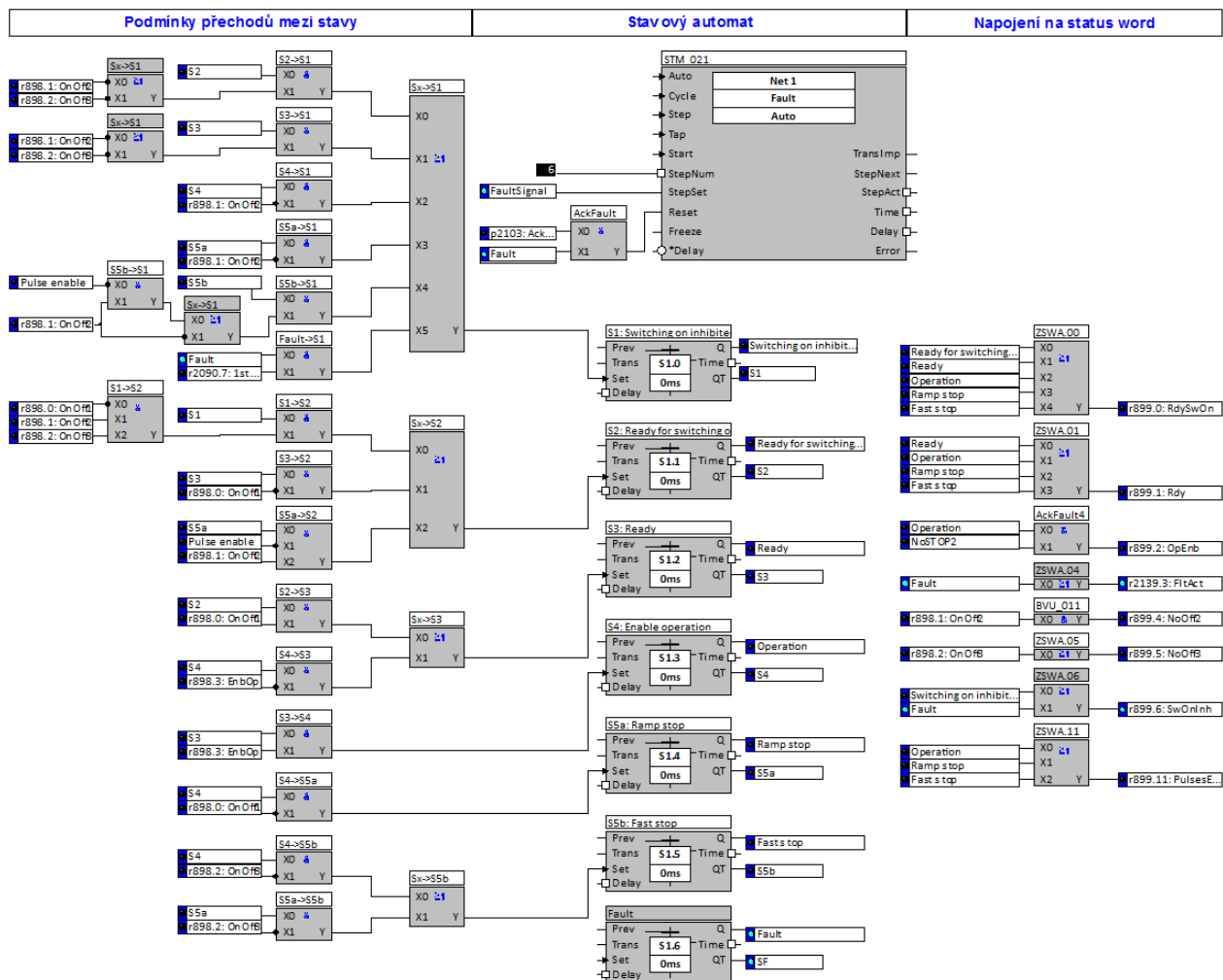
12. *Sinamics S120 Commissioning Manual: Commissioning Manual*. ERLANGEN, Germany: Siemens AG Industry Sector - Drive technologies - Motion Control Systems, 2011.
13. *Sinamics S120/S150 List Manual: Answers for industry*. ERLANGEN, Germany: Siemens AG Industry Sector - Drive technologies - Motion Control Systems, 2014.
14. FLAJTINGR, Jiří; KULE, Lumír. *Elektrické pohony se střídavými motory a polovodičovými měniči*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2005. ISBN 80-7043-354-X.
15. *Sinamics S120 Drive functions: Function Manual*. ERLANGEN, Germany: Siemens AG Digital Factory, 2016.
16. KULE, Lumír. *Dvoumotorové a mnohomotorové elektrické pohony*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2005. ISBN 80-7043-389-2.

Příloha A

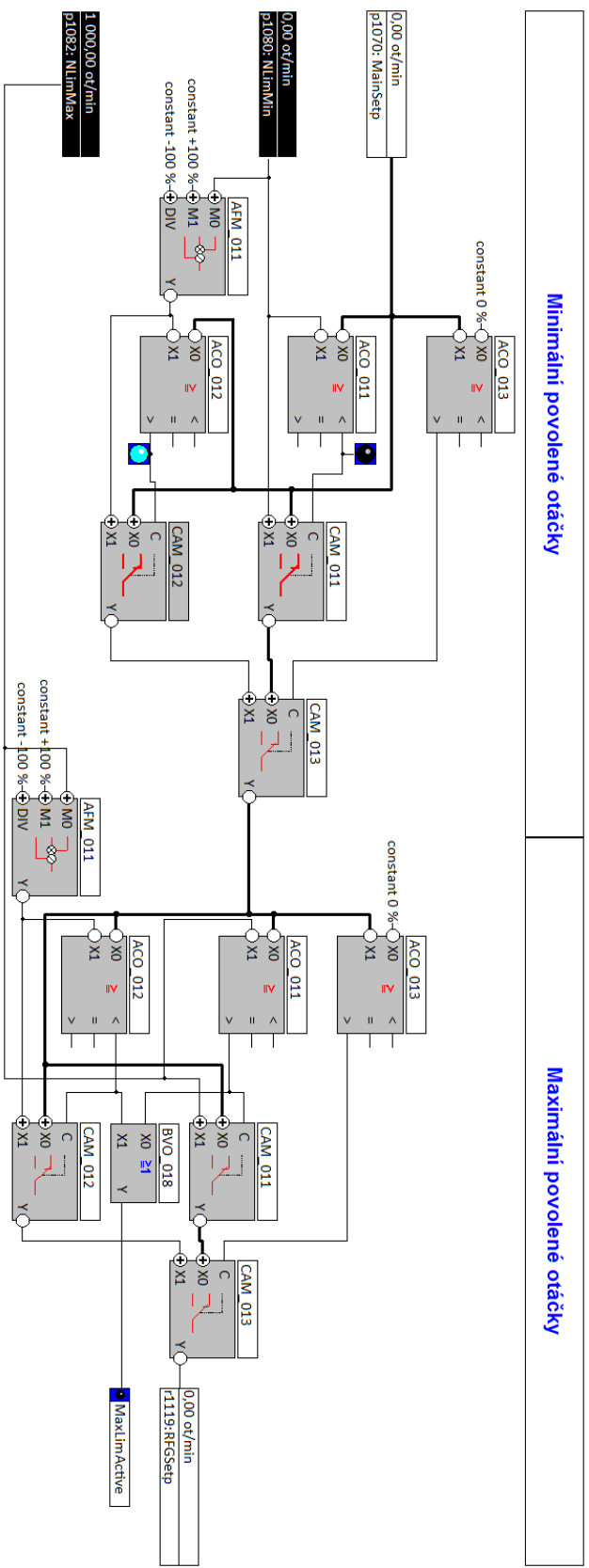
Modely měniče a zátěže



Obrázek A.1: VEC-TOR - Zpracování vstupních a výstupních signálů

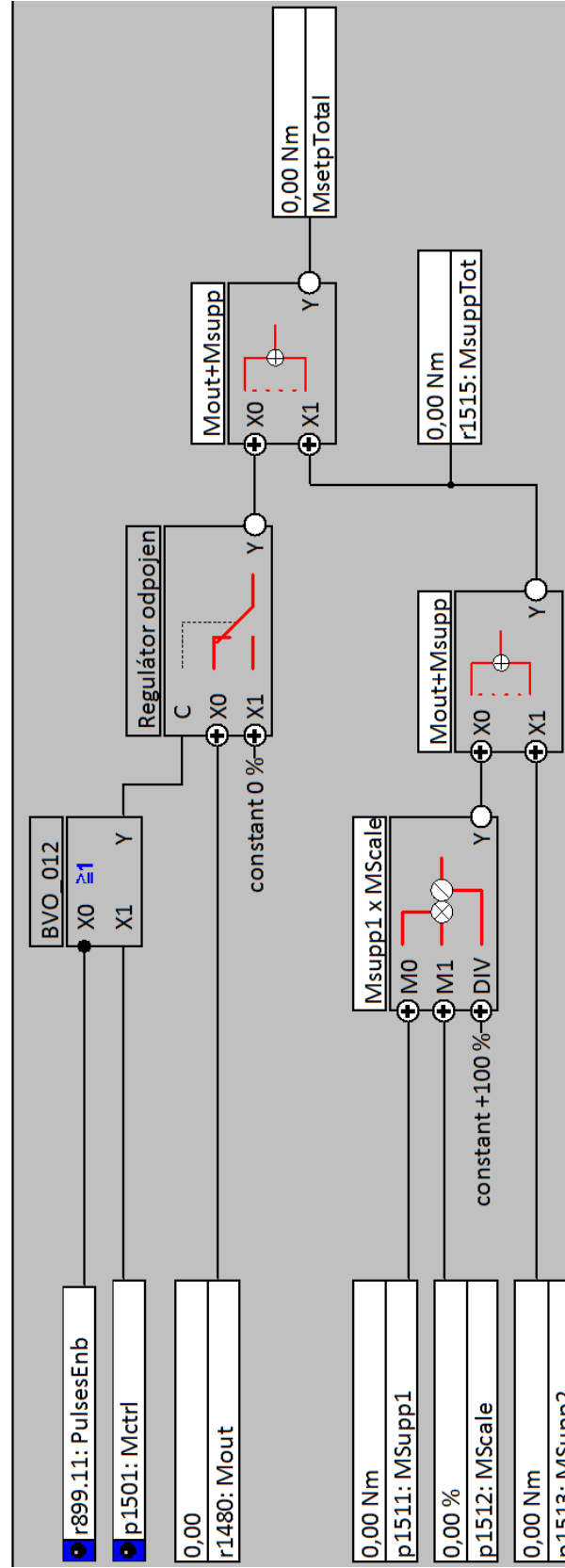


Obrázek A.2: VECTOR - Sekvencer

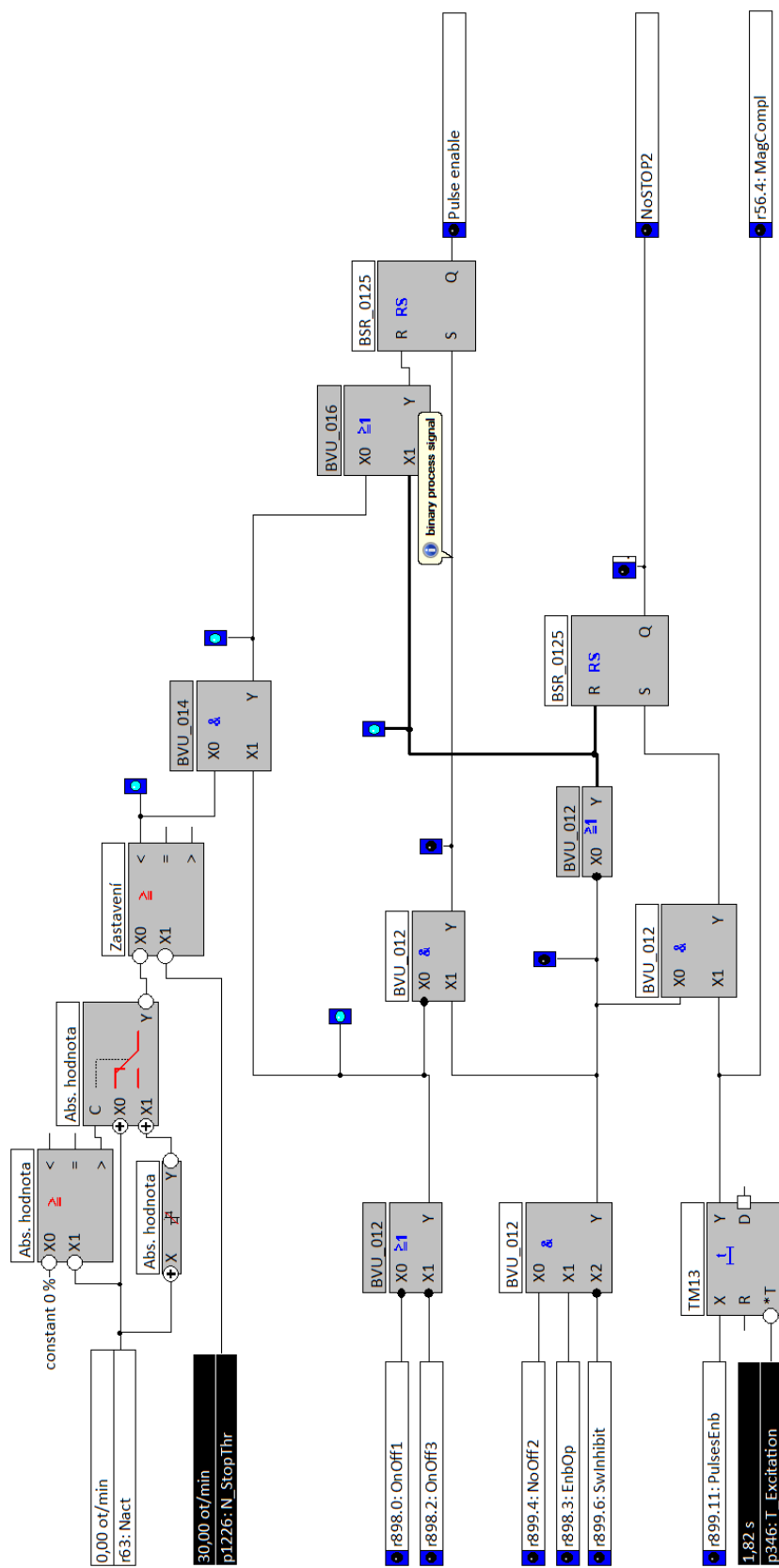


Obrázky A.3: VECTOR - Limítace otáčiek

Dodatečné žádané hodnoty momentů

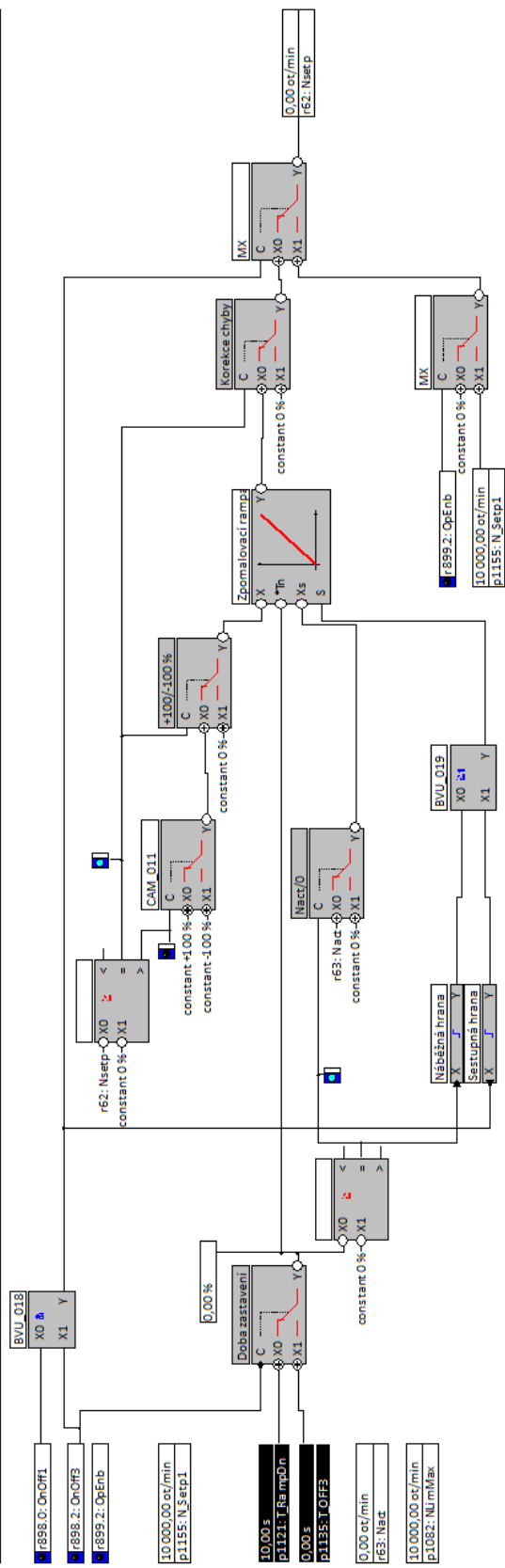


Obrázek A.6: VECTOR - Msupp

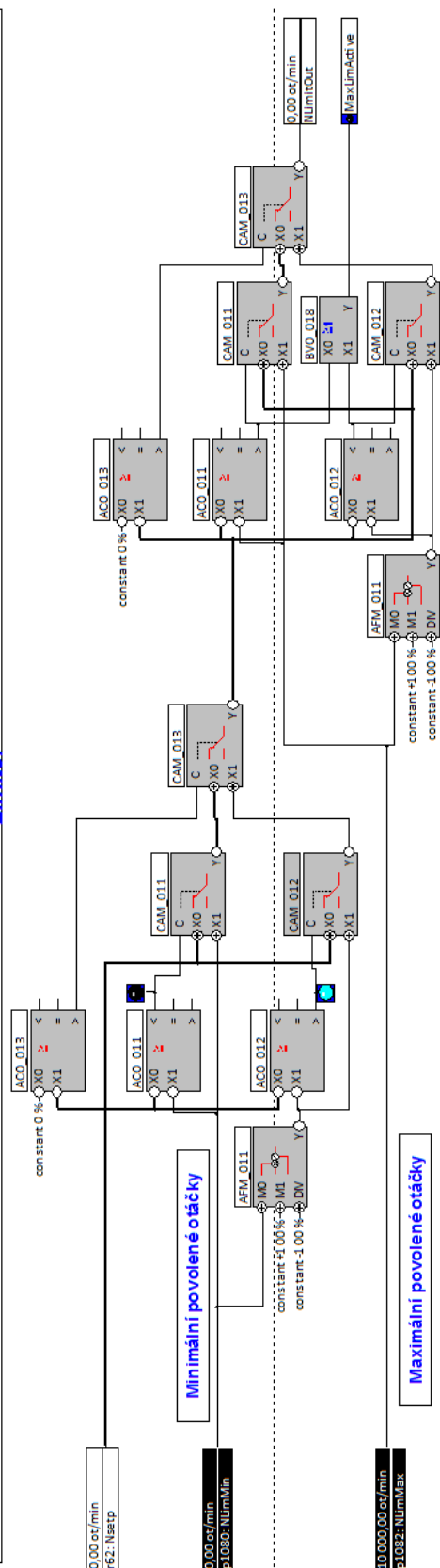


Obrázek A.8: VECTOR - Generování signálu Pulse enable

Setpoint channel



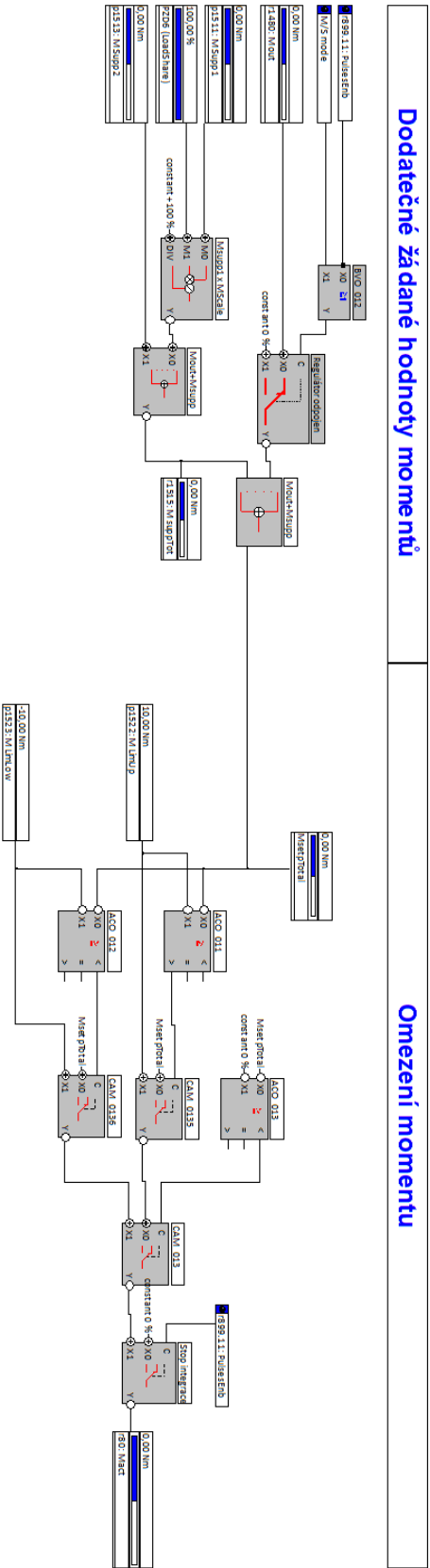
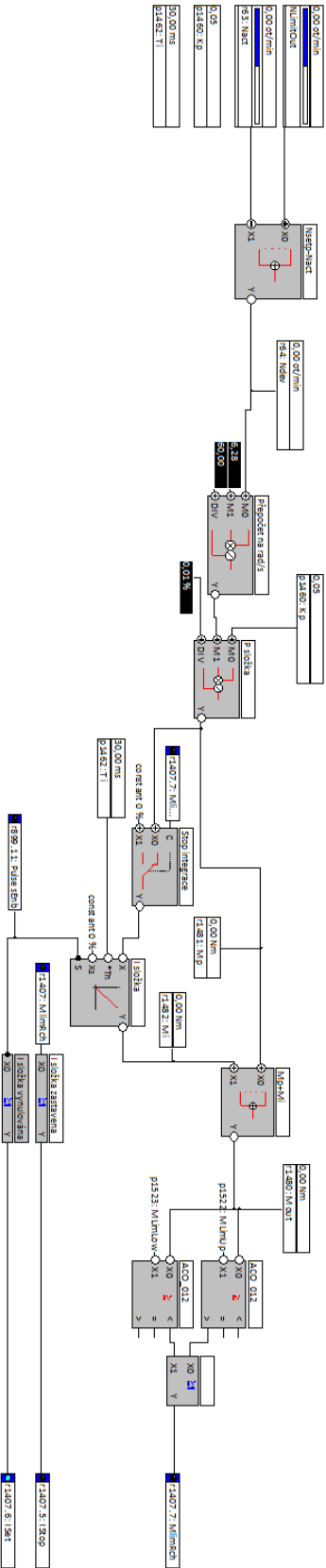
Limiter



Obrázek A.10: SERVO - Setpoint channel

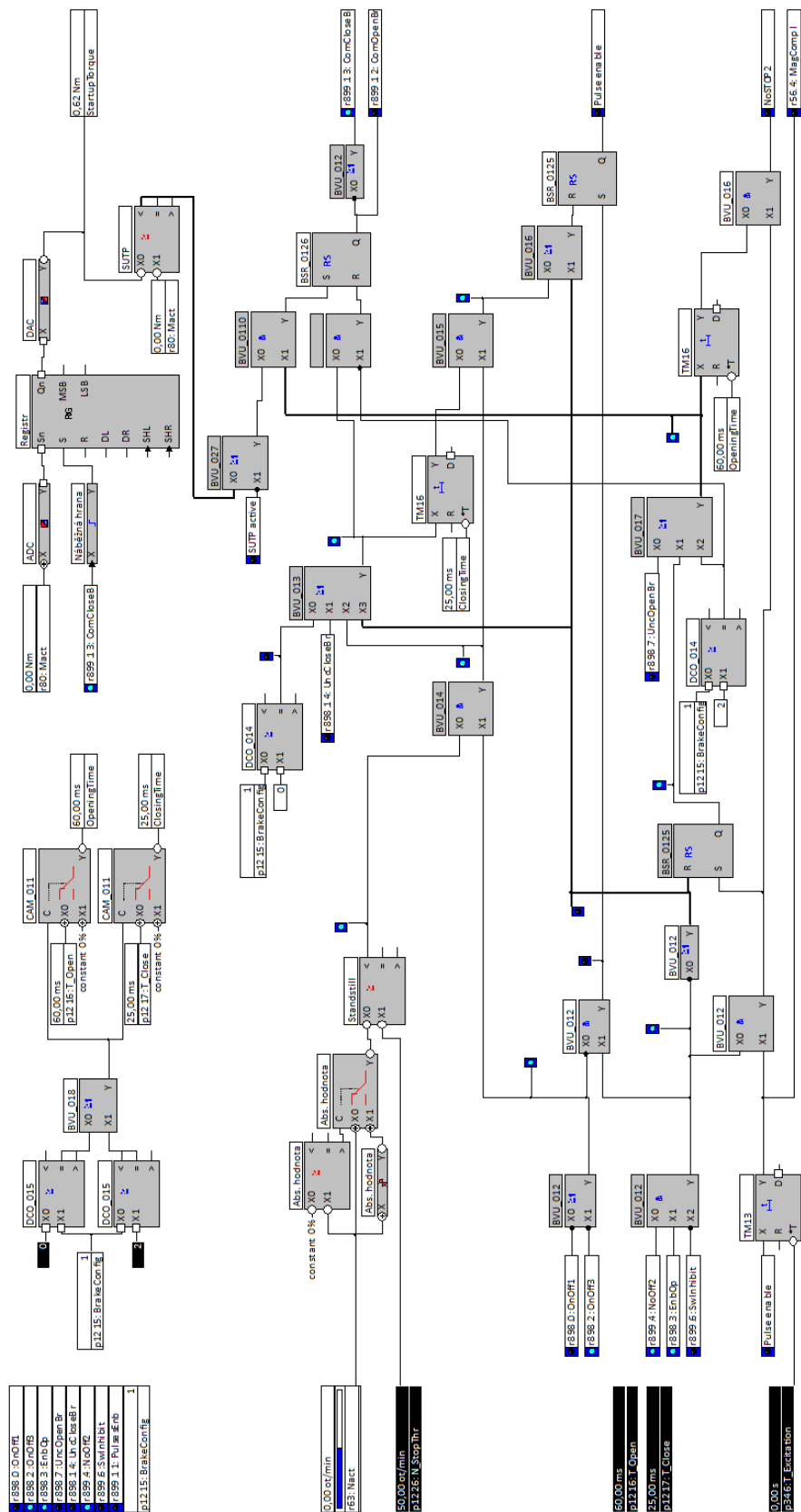
Zpětnovazební smyčka

PI regulátor otáček



Obrázek A.11: SERVO - Zpětnovazební smyčka

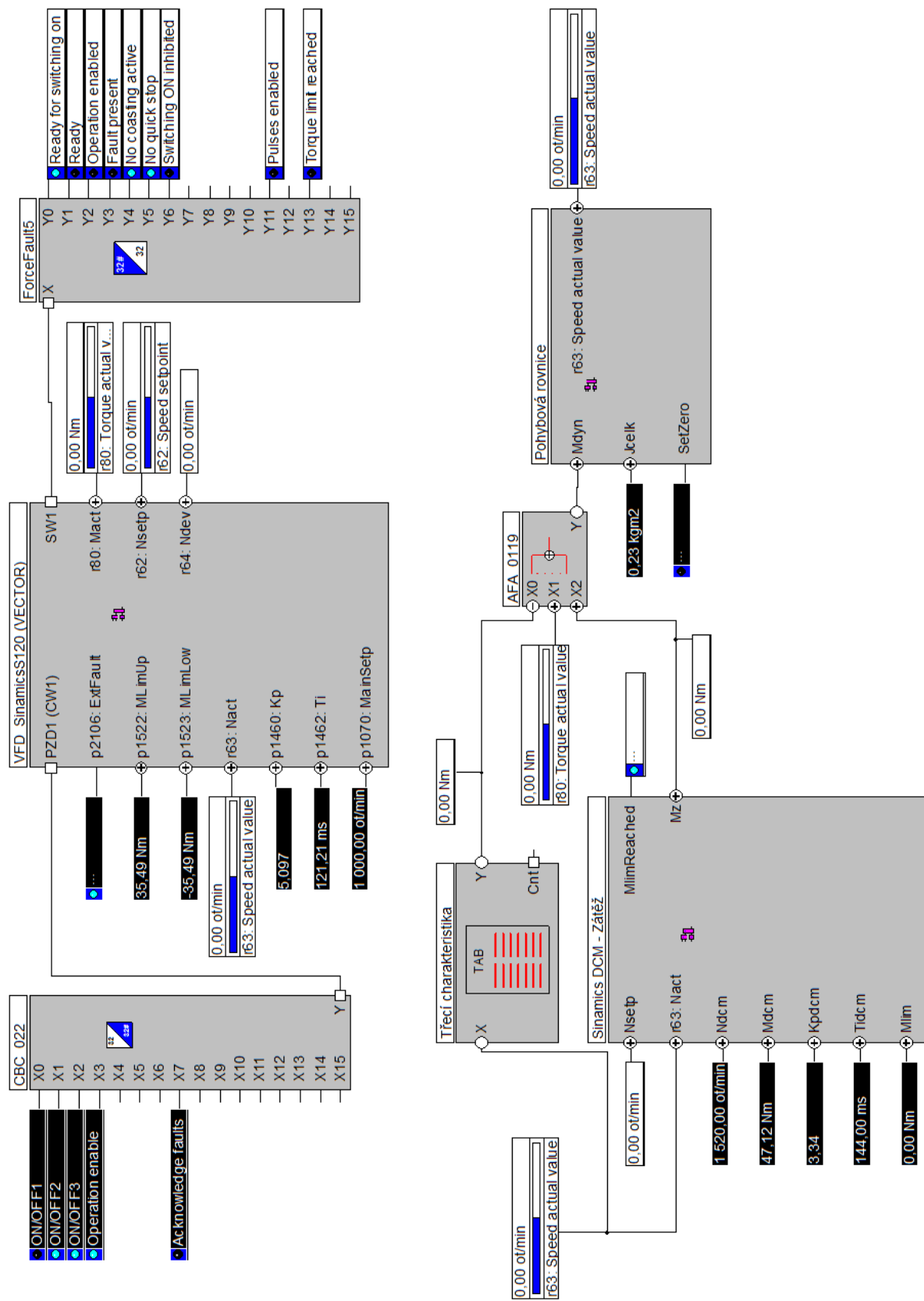
Ovládání brzdy (Brake Control)



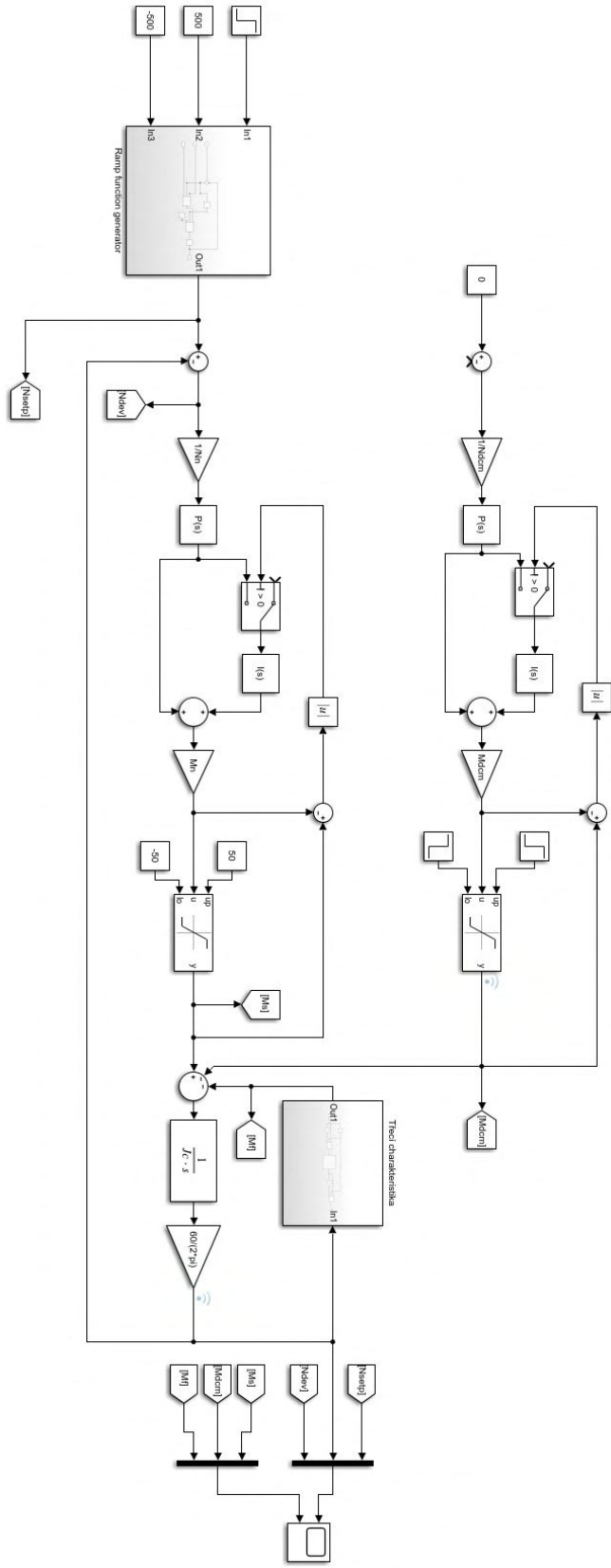
Obrázek A.12: SERVO - Ovládání brzdy

Příloha B

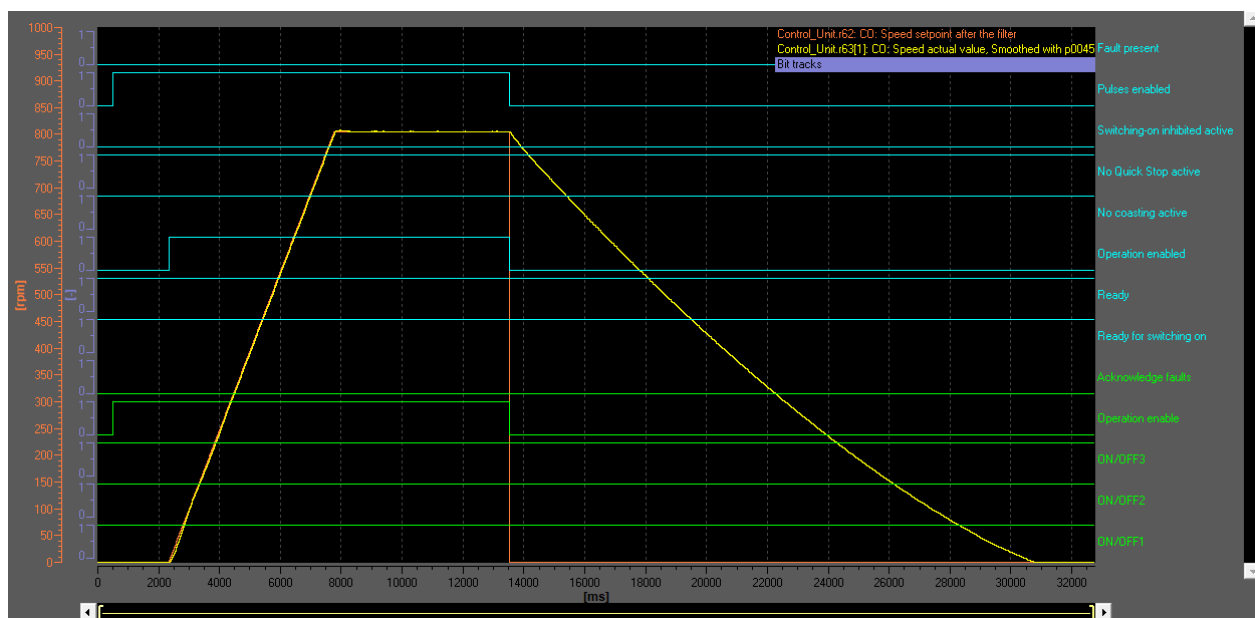
Testy jednomotorového pohonu



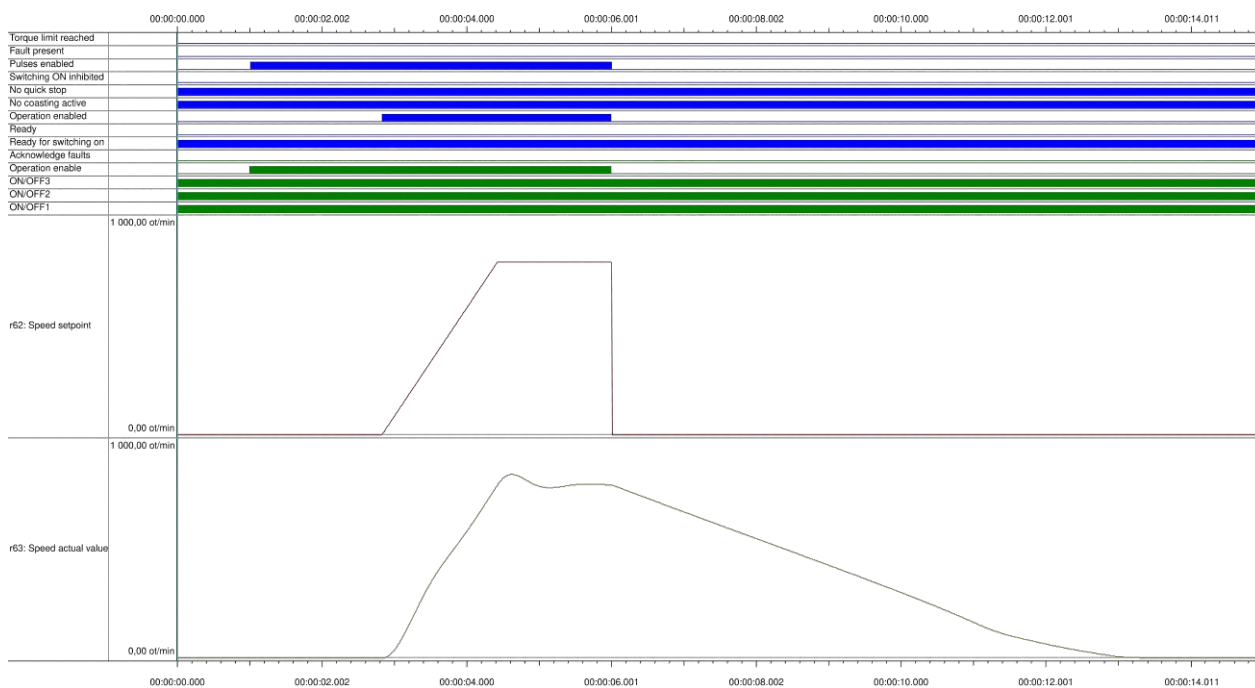
Obrázek B.1: Testovací plocha pro ověření funkcí digitálního pohonu s měničem G120/S120 v prostředí WinMOD



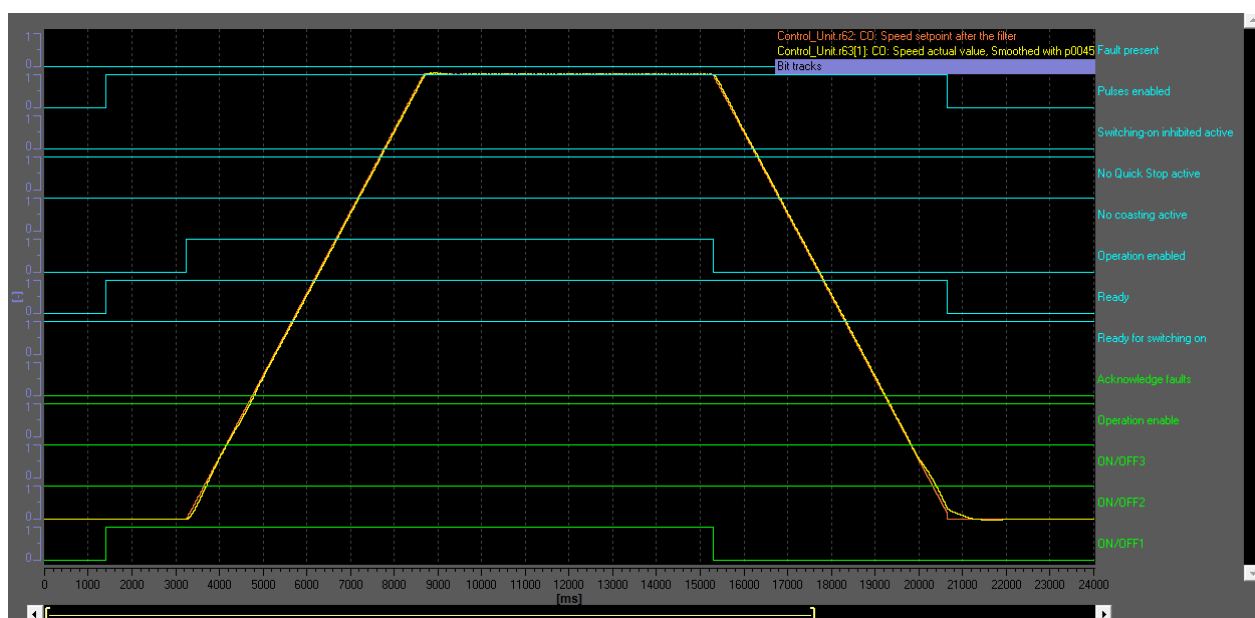
Obrázek B.2: Model regulační struktury digitálního dvojčete v Matlab-Simulink



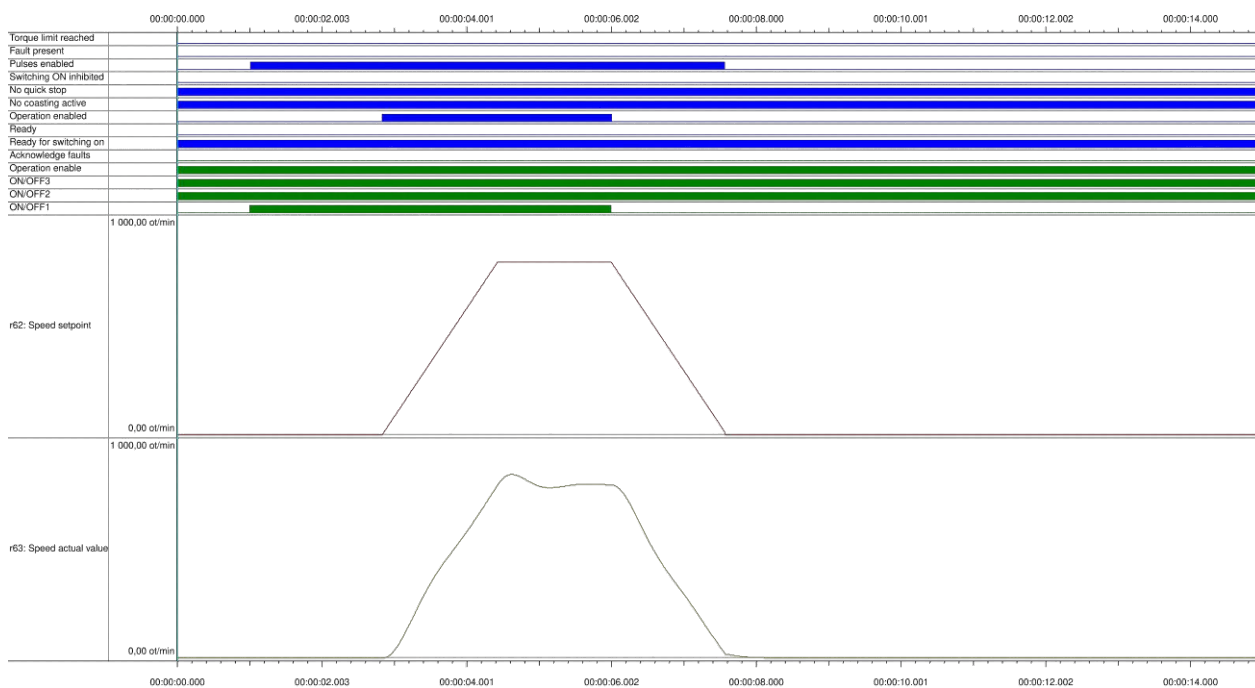
Obrázek B.3: G120 - zapnutí a vypnutí signálem Enable operation - volný doběh



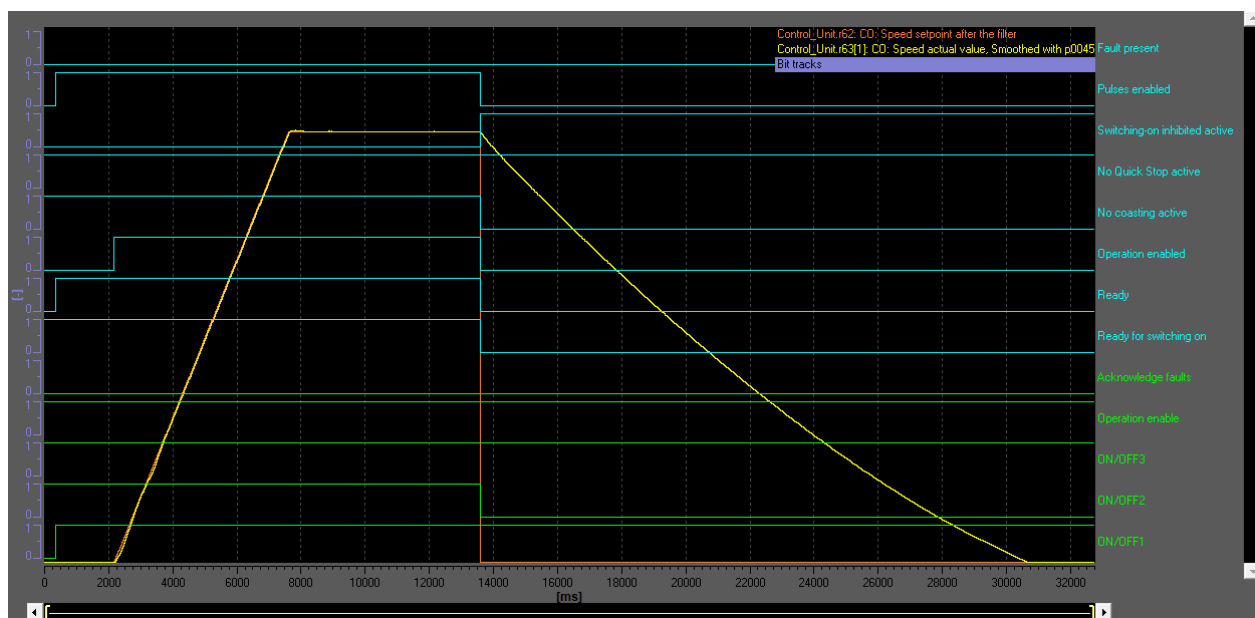
Obrázek B.4: WinMOD - zapnutí a vypnutí signálem Enable operation - volný doběh



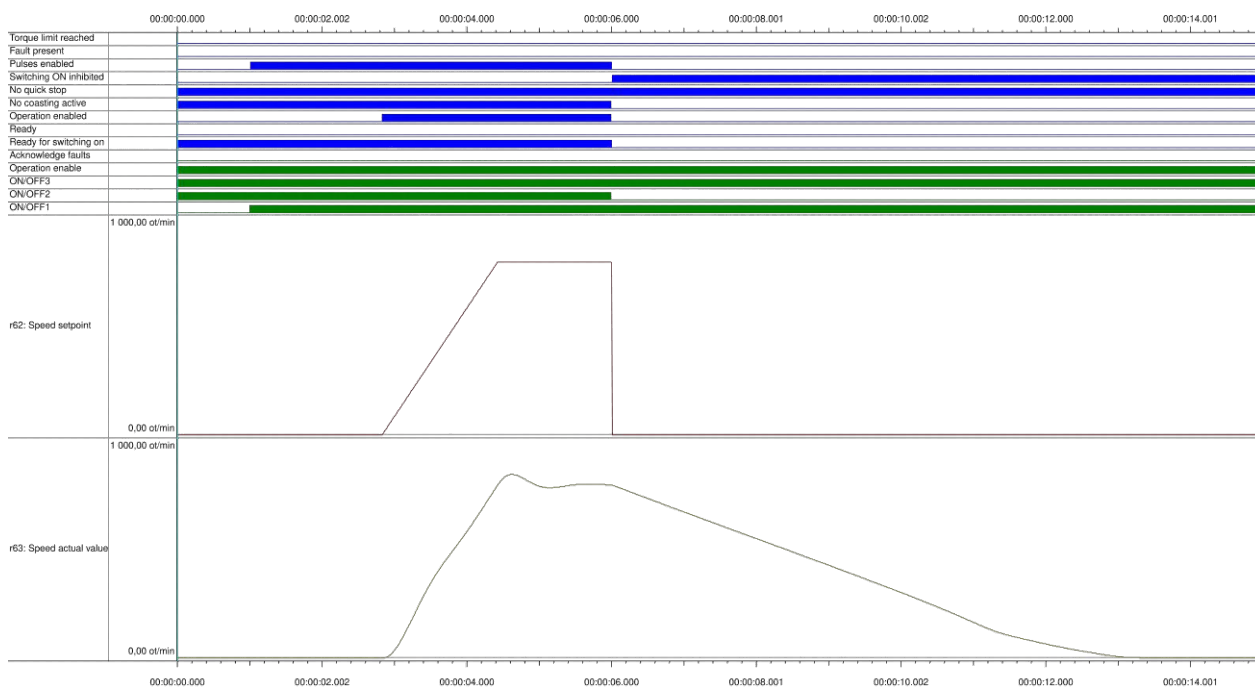
Obrázek B.5: G120 - zapnutí a vypnutí signálem ON/OFF1



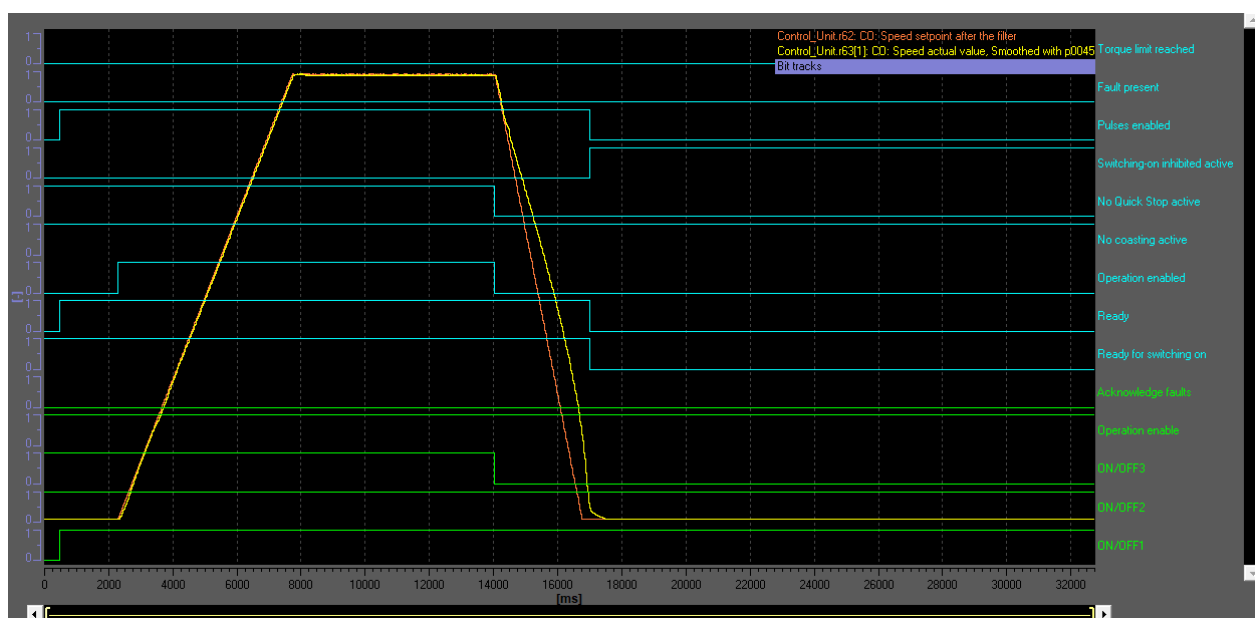
Obrázek B.6: WinMOD - zapnutí a vypnutí signálem ON/OFF1



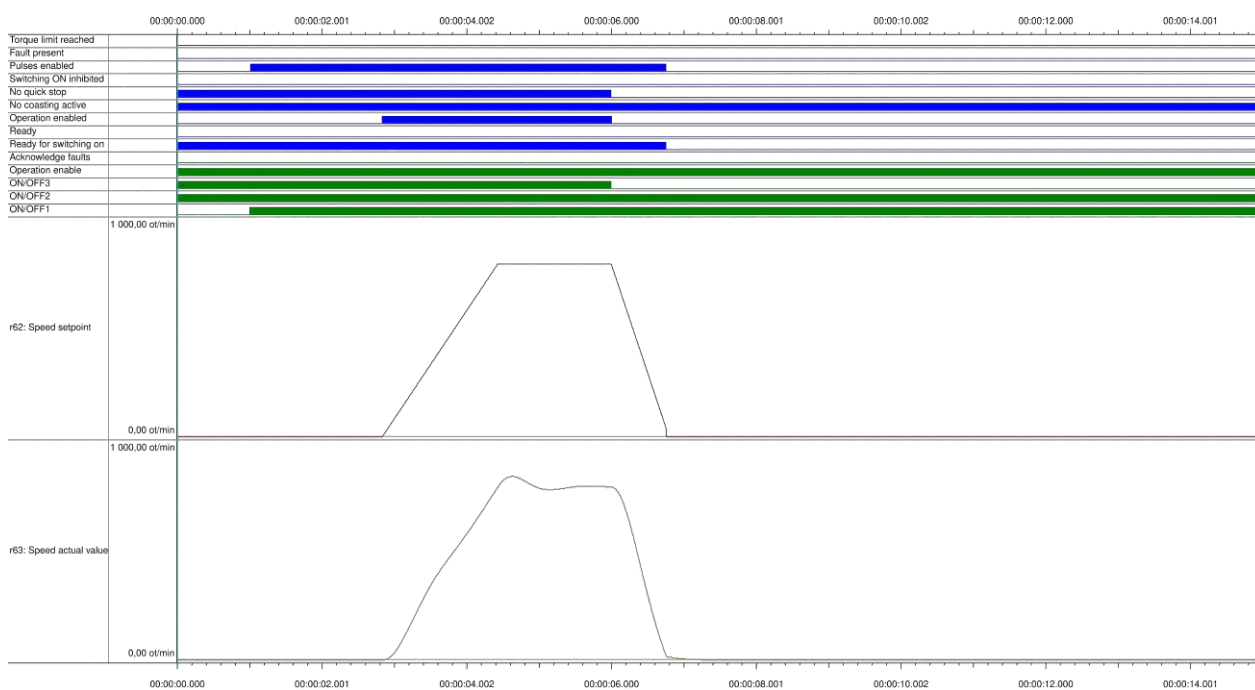
Obrázek B.7: G120 - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF2 - volný doběh.



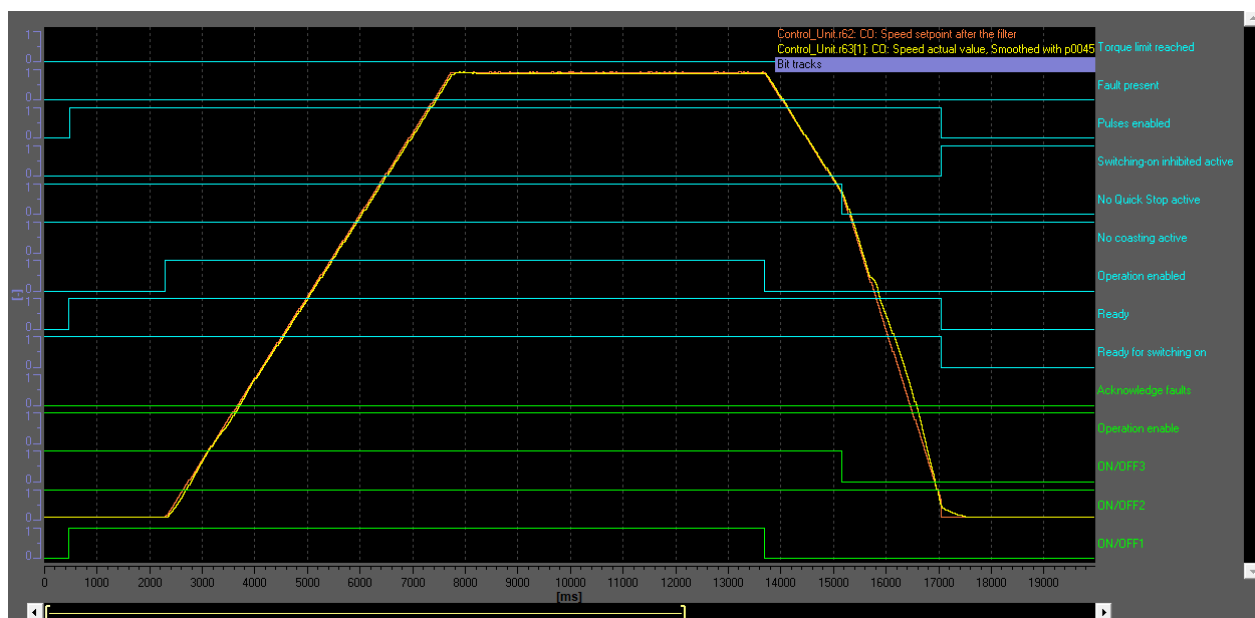
Obrázek B.8: WinMOD - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF2 - volný doběh.



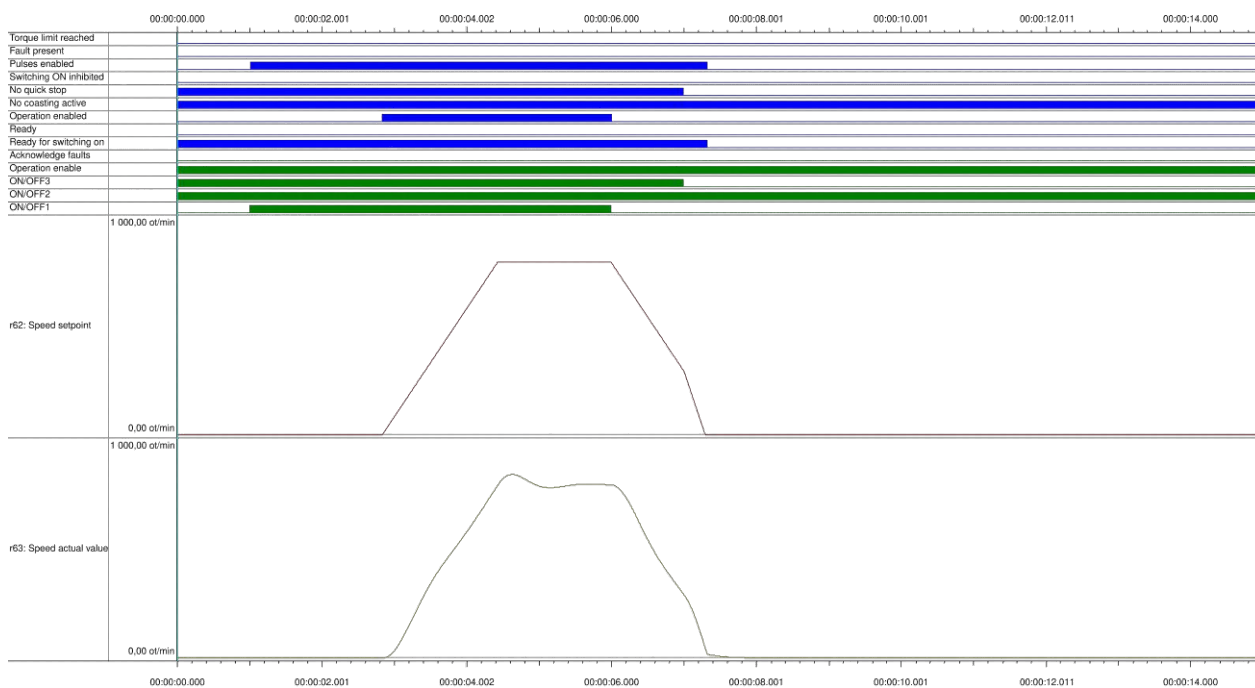
Obrázek B.9: G120 - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF3



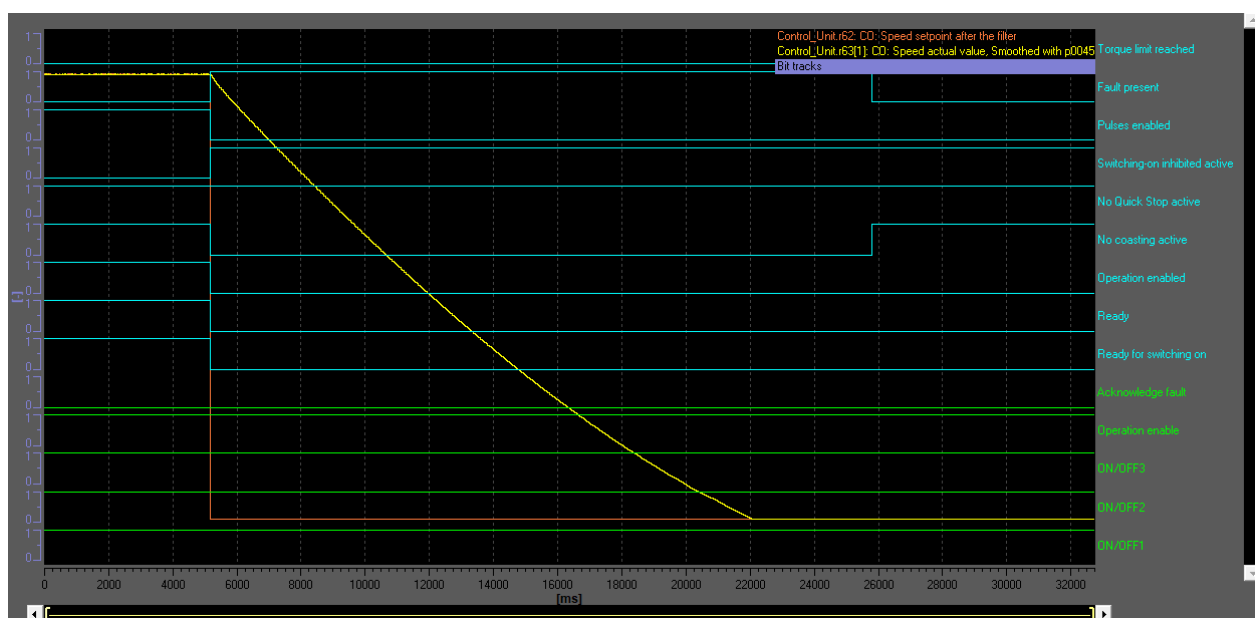
Obrázek B.10: G120 - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF3



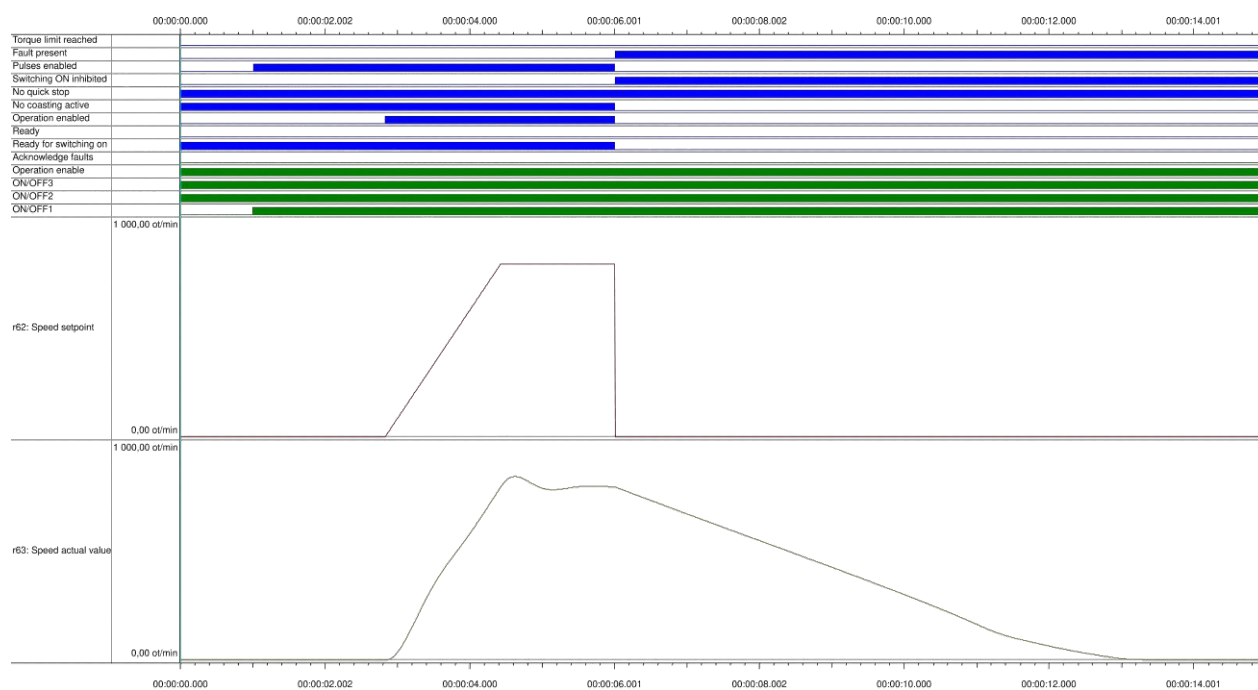
Obrázek B.11: G120 - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF1 a přechod do OFF3



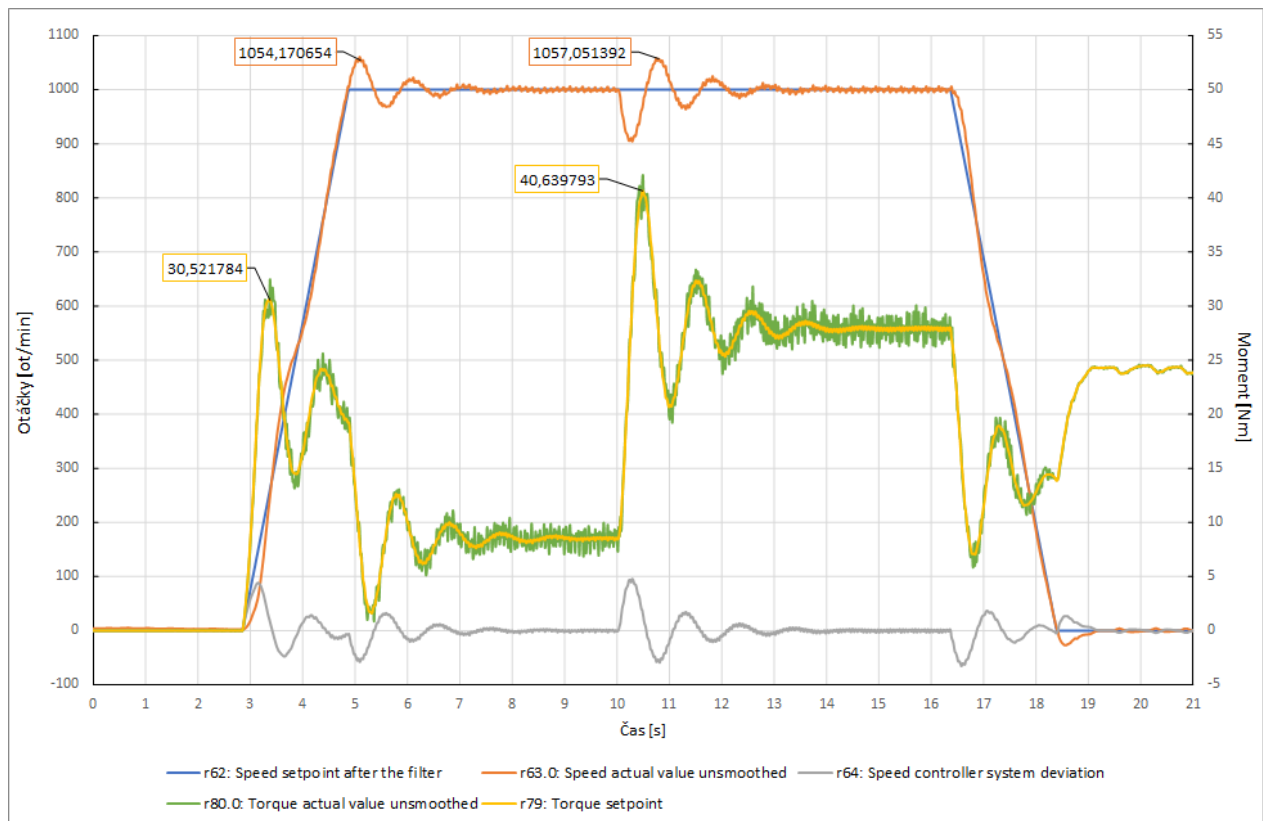
Obrázek B.12: G120 - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF1 a přechod do OFF3



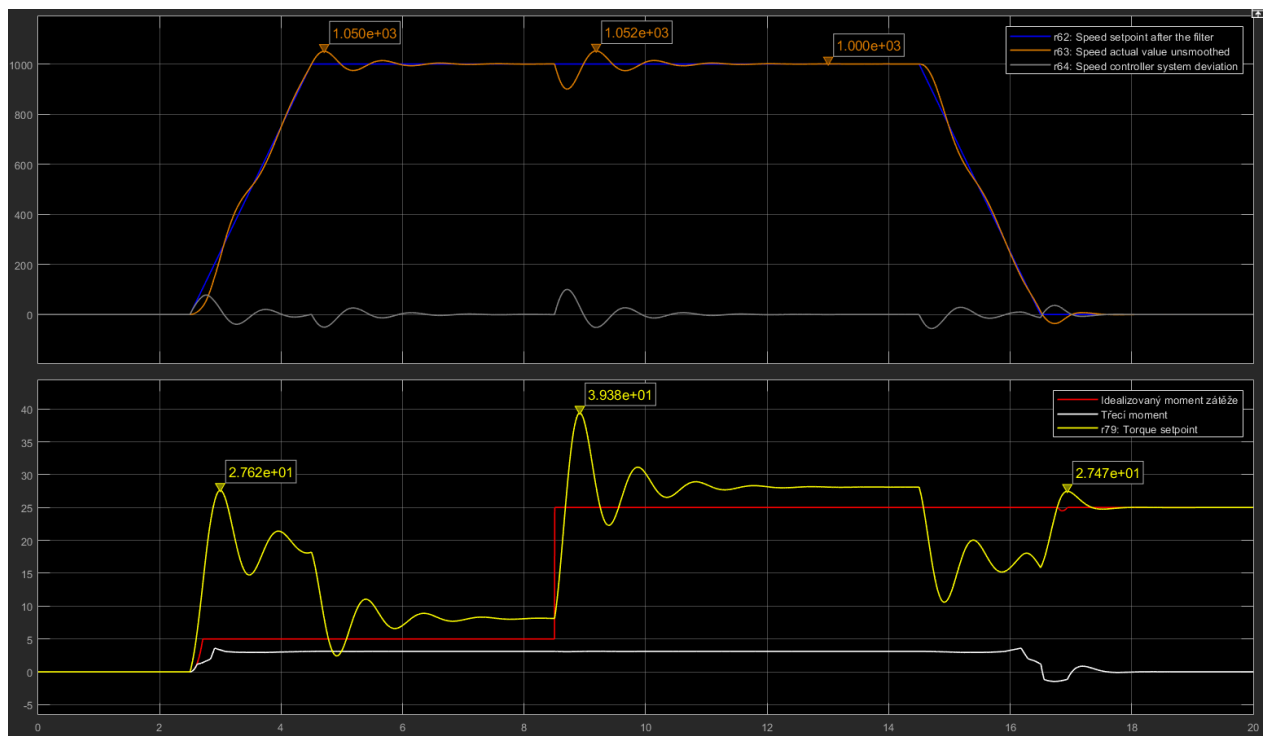
Obrázek B.13: G120 - simulace poruchy



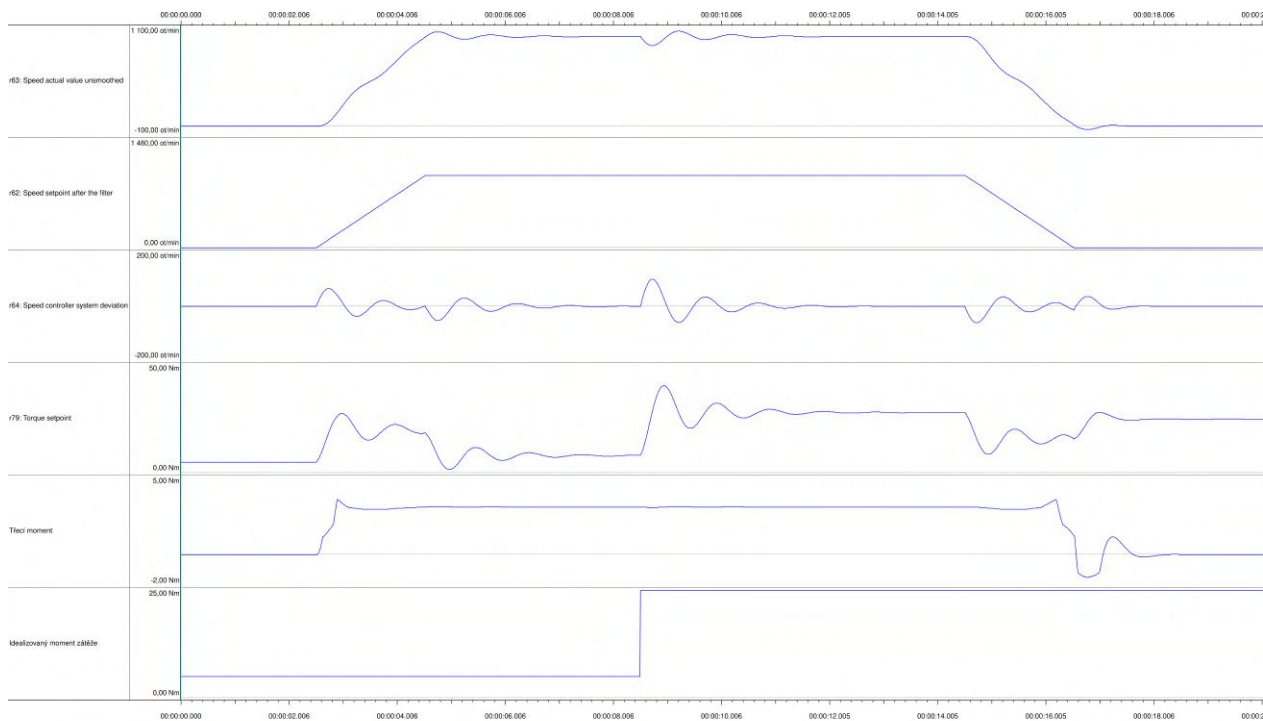
Obrázek B.14: G120 - simulace poruchy



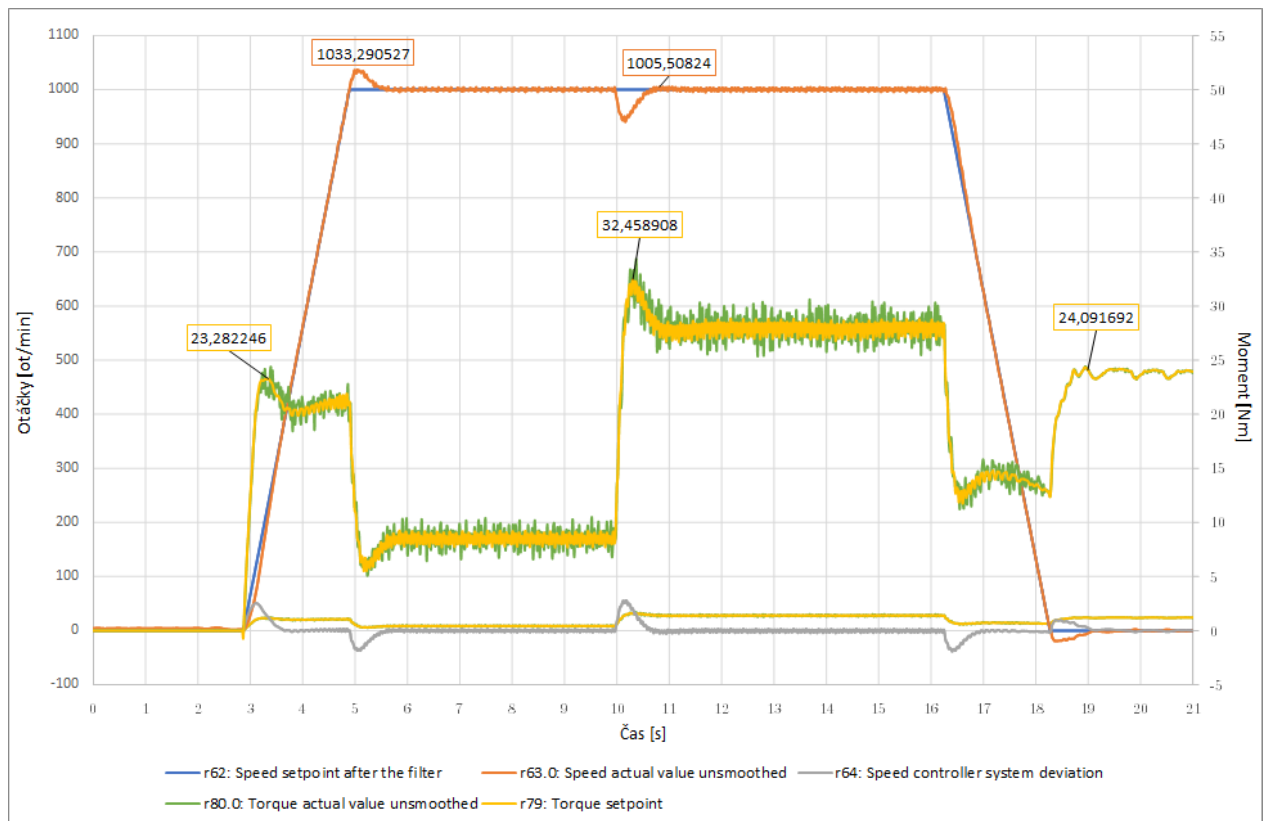
Obrázek B.15: G120 - skok zátěže, pomalé nastavení regulátoru



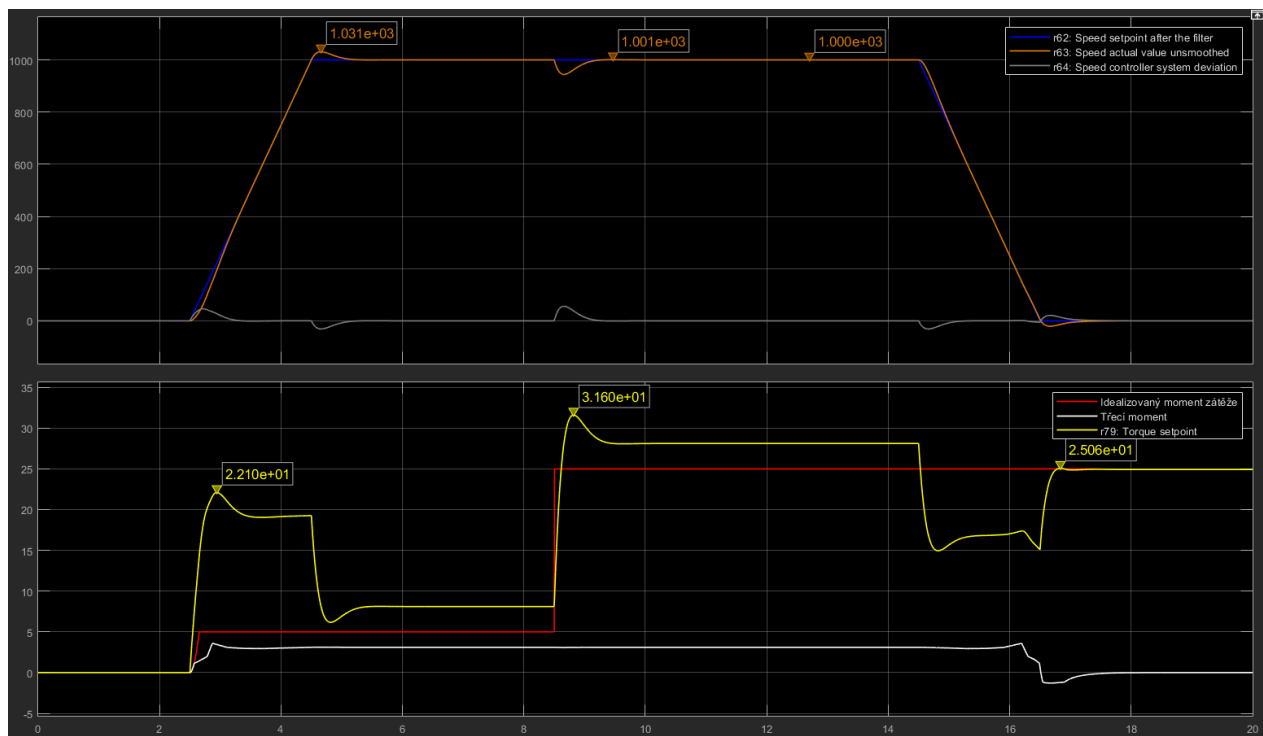
Obrázek B.16: Simulink - skok zátěže, pomalé nastavení regulátoru



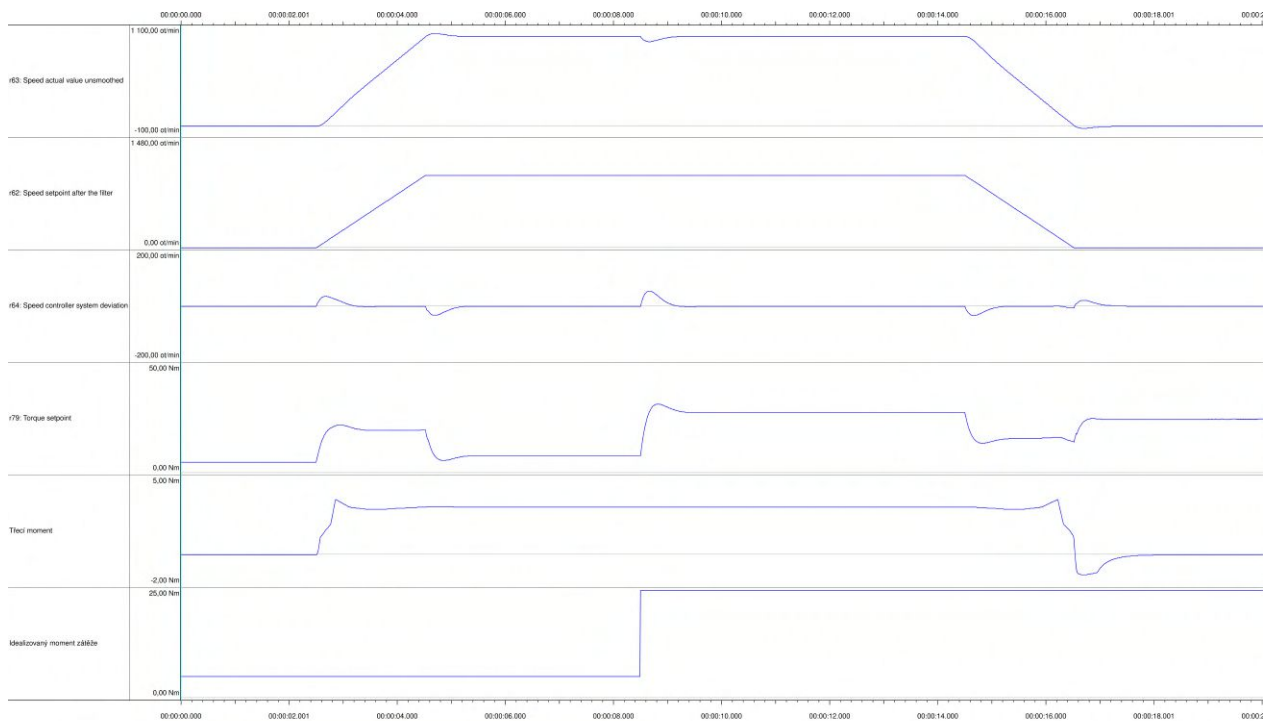
Obrázek B.17: WinMOD - skok zátěže, pomalé nastavení regulátoru



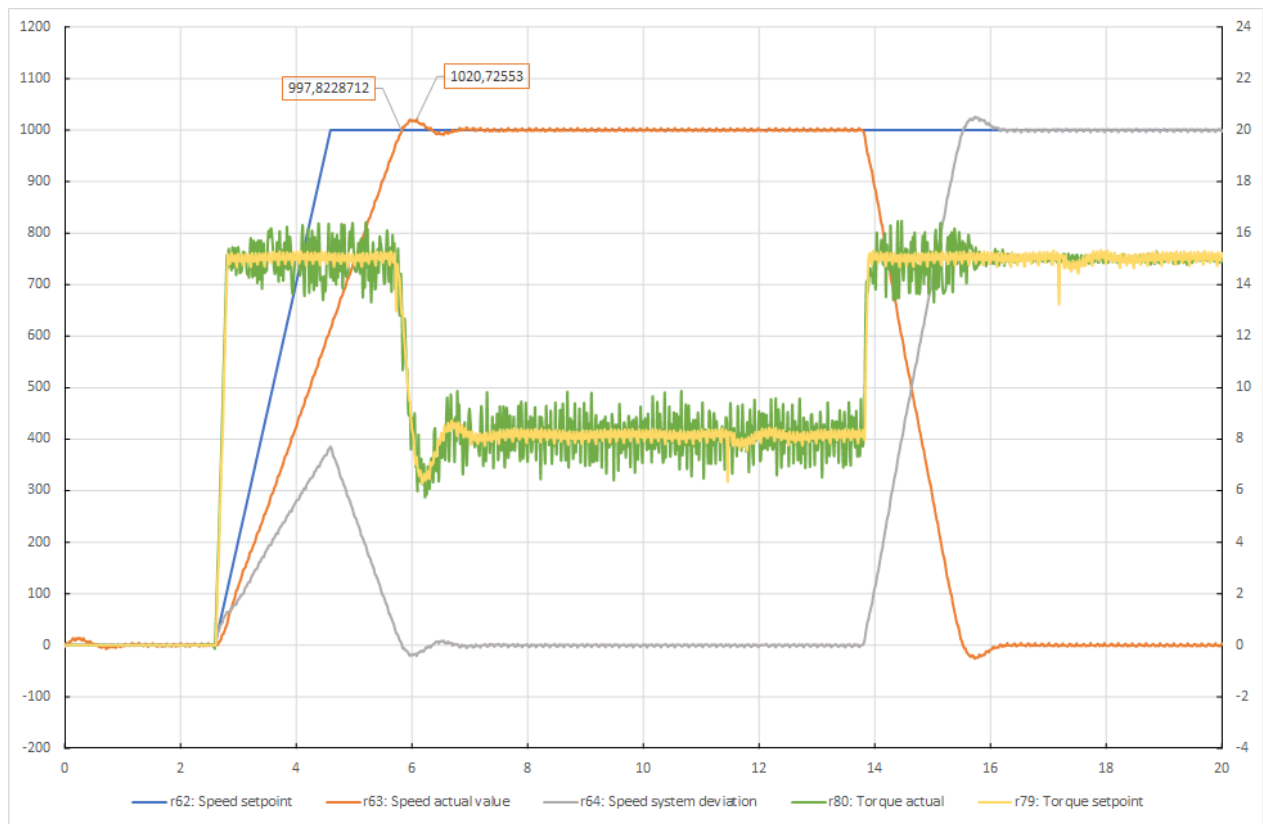
Obrázek B.18: G120 - skok zátěže, rychlé (tvrdé) nastavení regulátoru



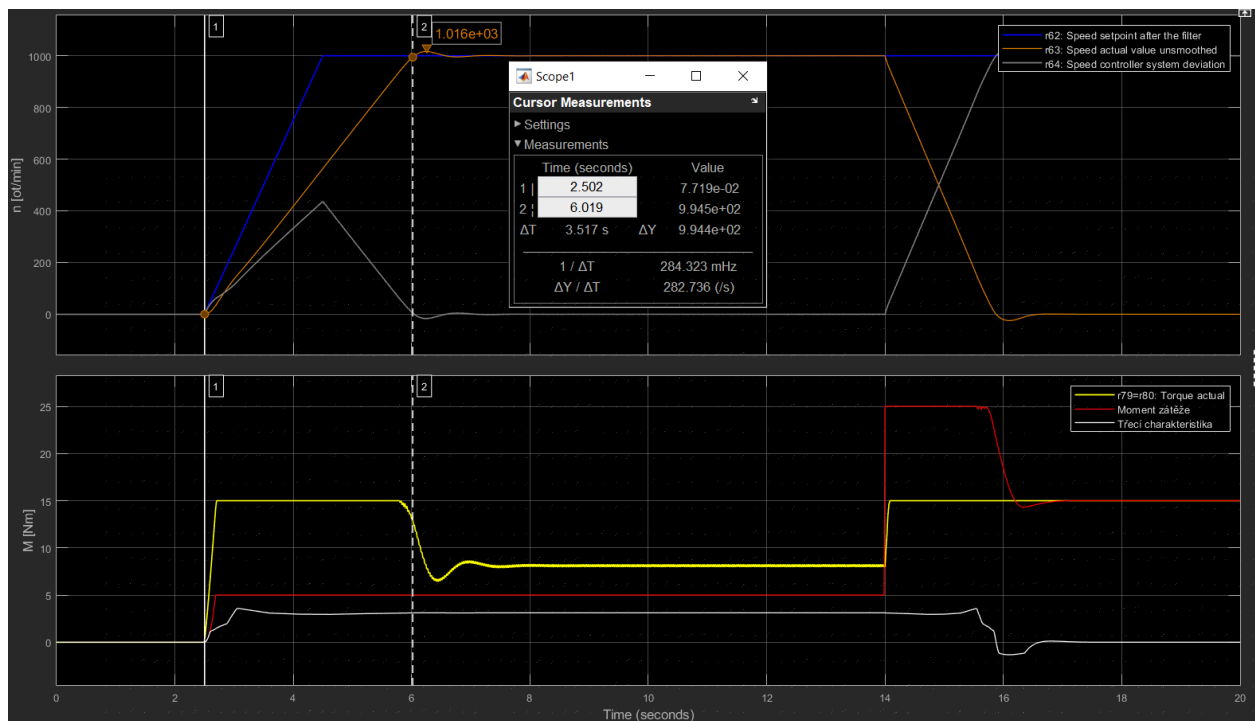
Obrázek B.19: Simulink - skok zátěže, rychlé (tvrdé) nastavení regulátoru



Obrázek B.20: WinMOD - skok zátěže, rychlé (tvrdé) nastavení regulátoru



Obrázek B.21: G120 - dosažení momentového limitu



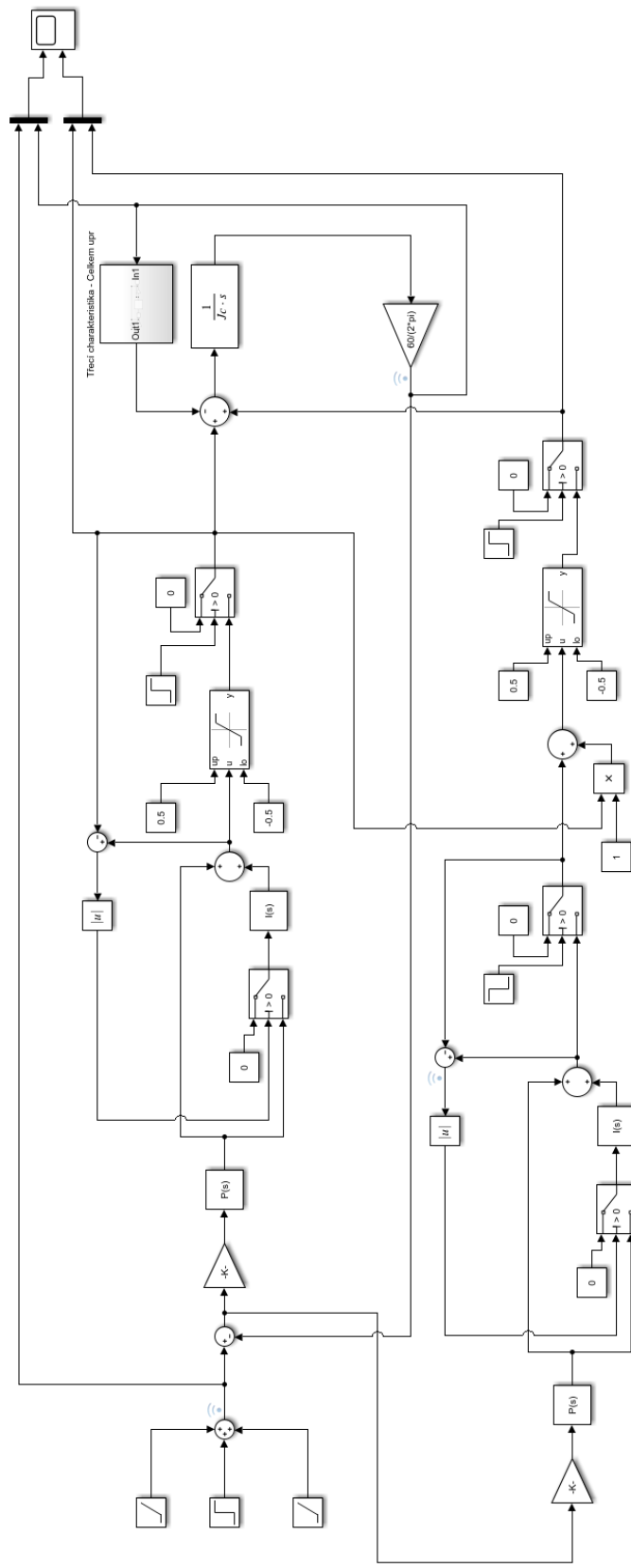
Obrázek B.22: Simulink - dosažení momentového limitu



Obrázek B.23: WinMOD - dosažení momentového limitu

Příloha C

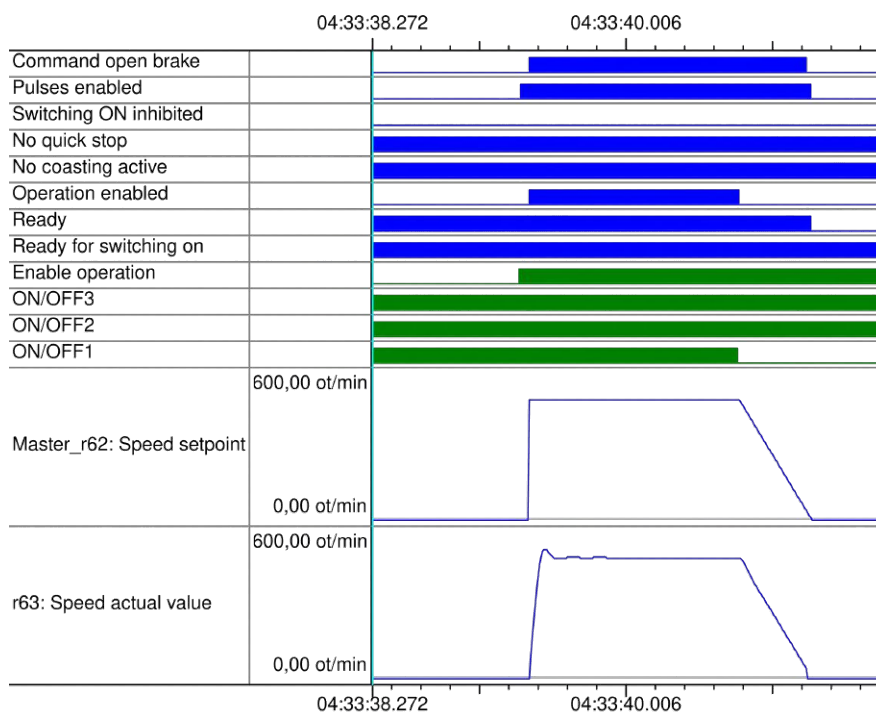
Testy pohonu v konfiguraci Master-Slave



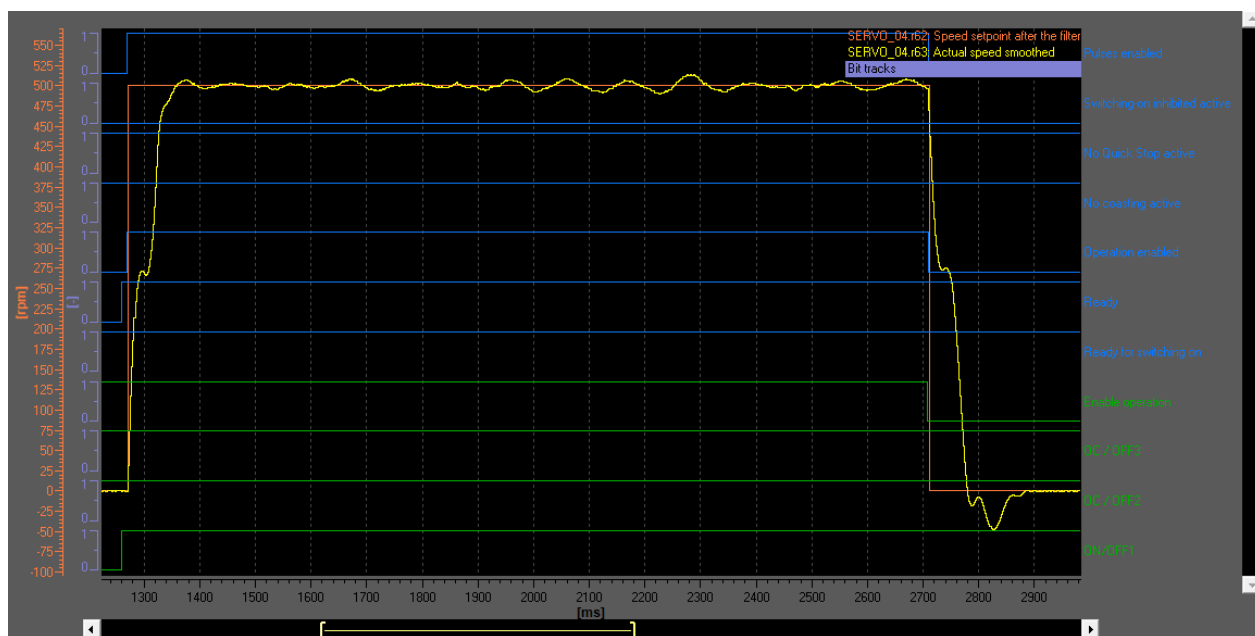
Obrázek C.2: Testovací plocha pro ověření funkcí digitálního dvojčete pohonu Master-Slave s měničem S120 v prostředí Matlab-Simulink



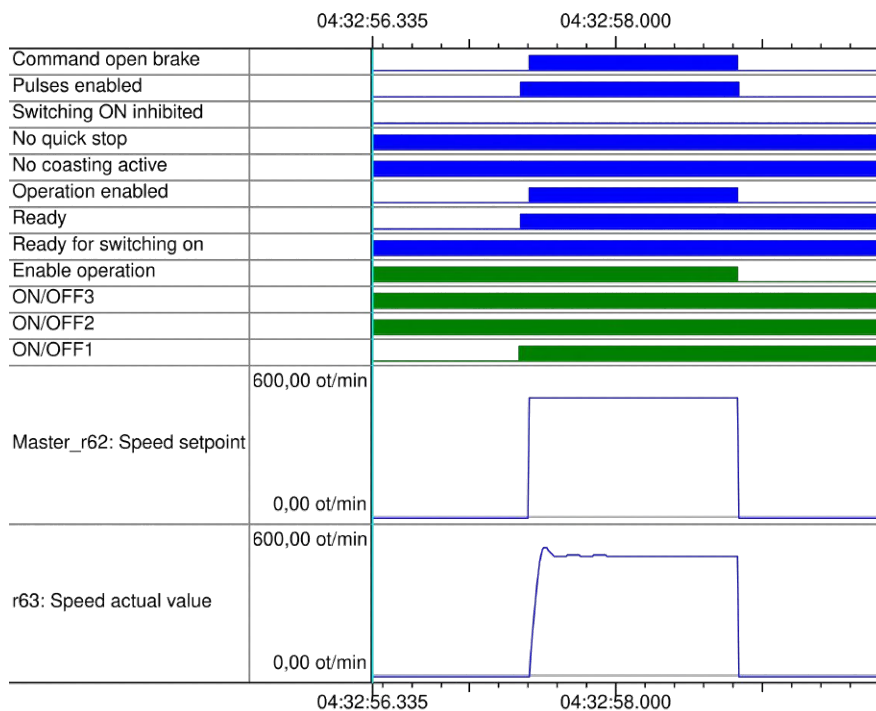
Obrázek C.3: S120 - zapnutí signálem Enable operation, vypnutí ON/OFF1



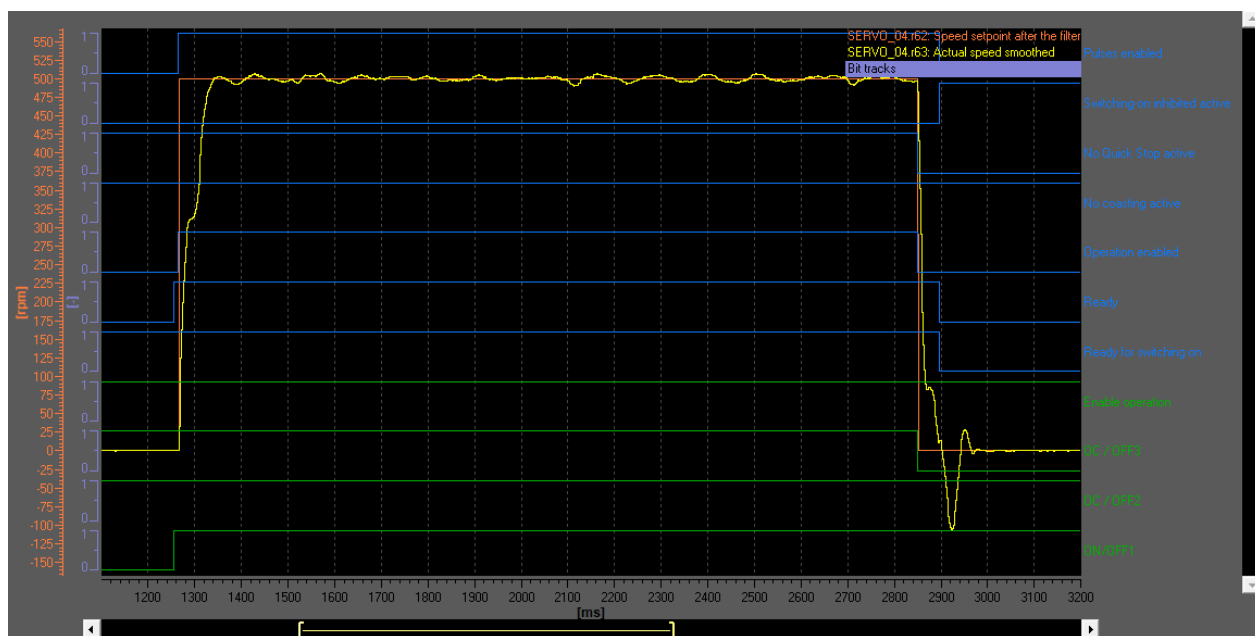
Obrázek C.4: WinMOD - zapnutí signálem Enable operation, vypnutí ON/OFF1



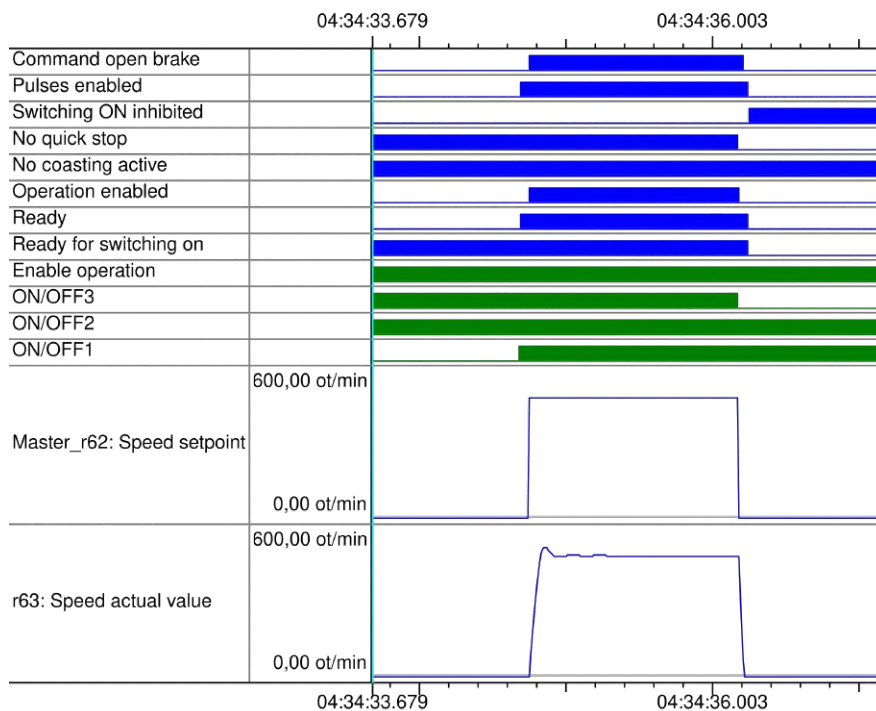
Obrázek C.5: S120 - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí Enable operation



Obrázek C.6: WinMOD - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí Enable operation



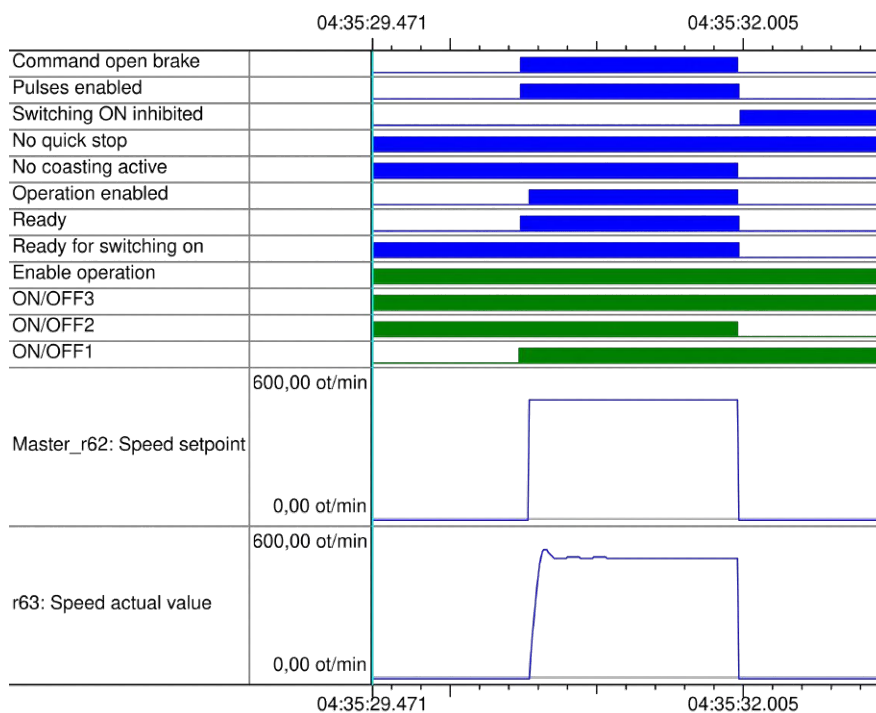
Obrázek C.7: S120 - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF3



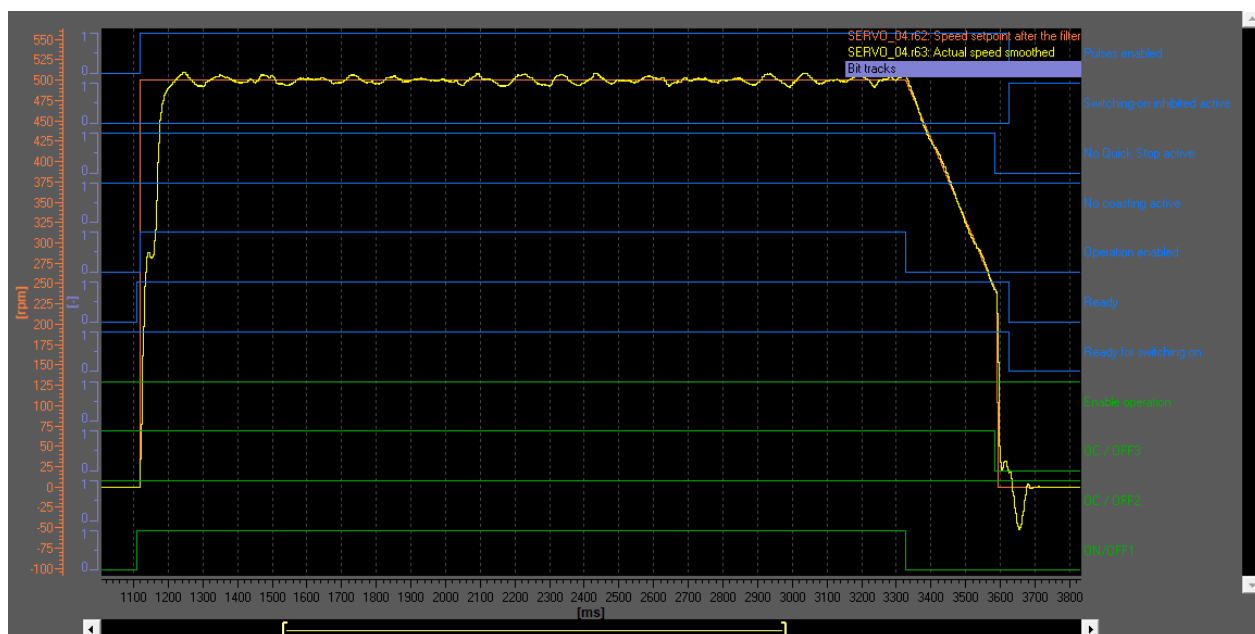
Obrázek C.8: WinMOD - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF3



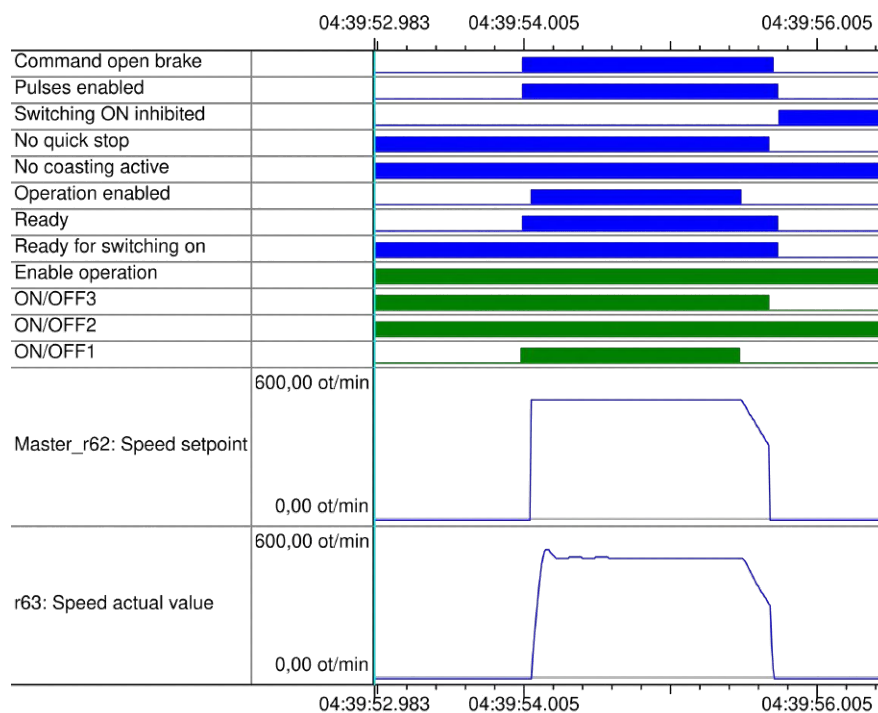
Obrázek C.9: S120 - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF2



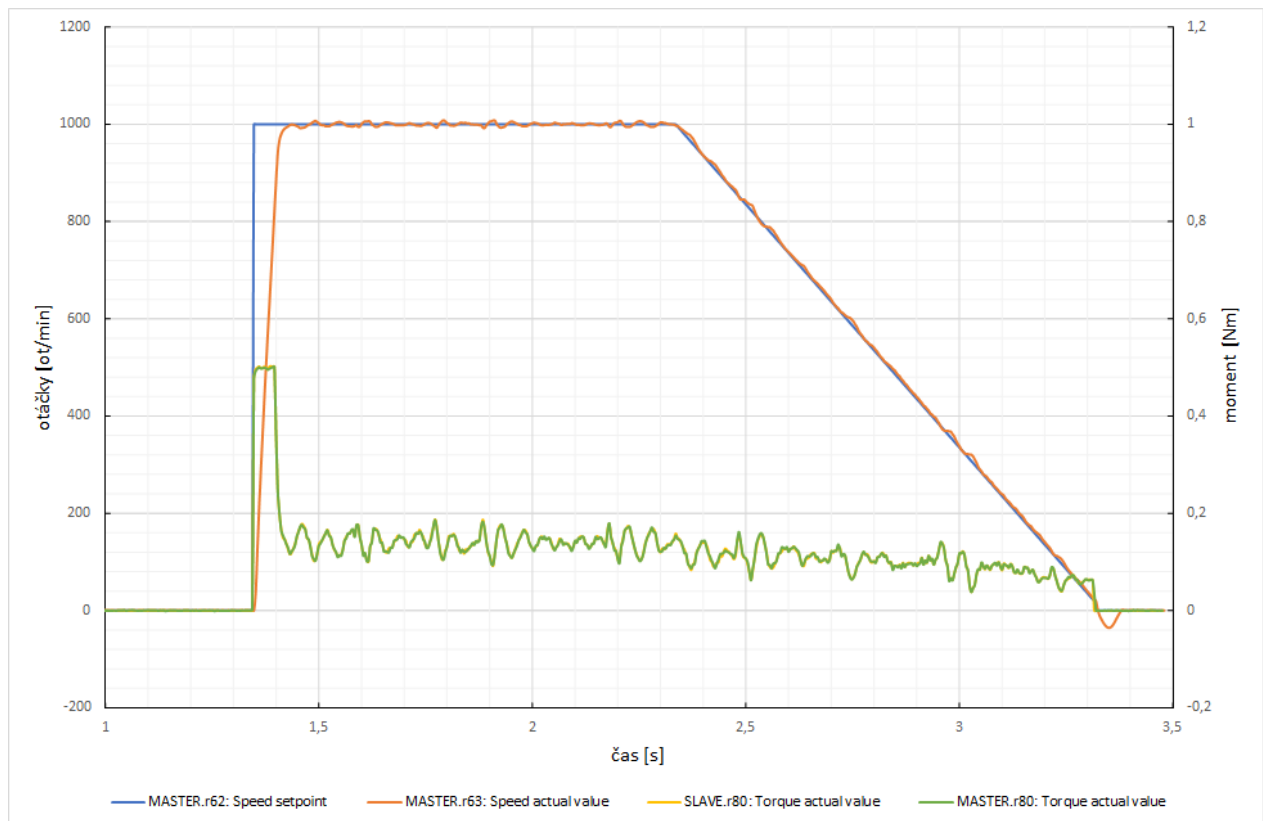
Obrázek C.10: WinMOD - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF2



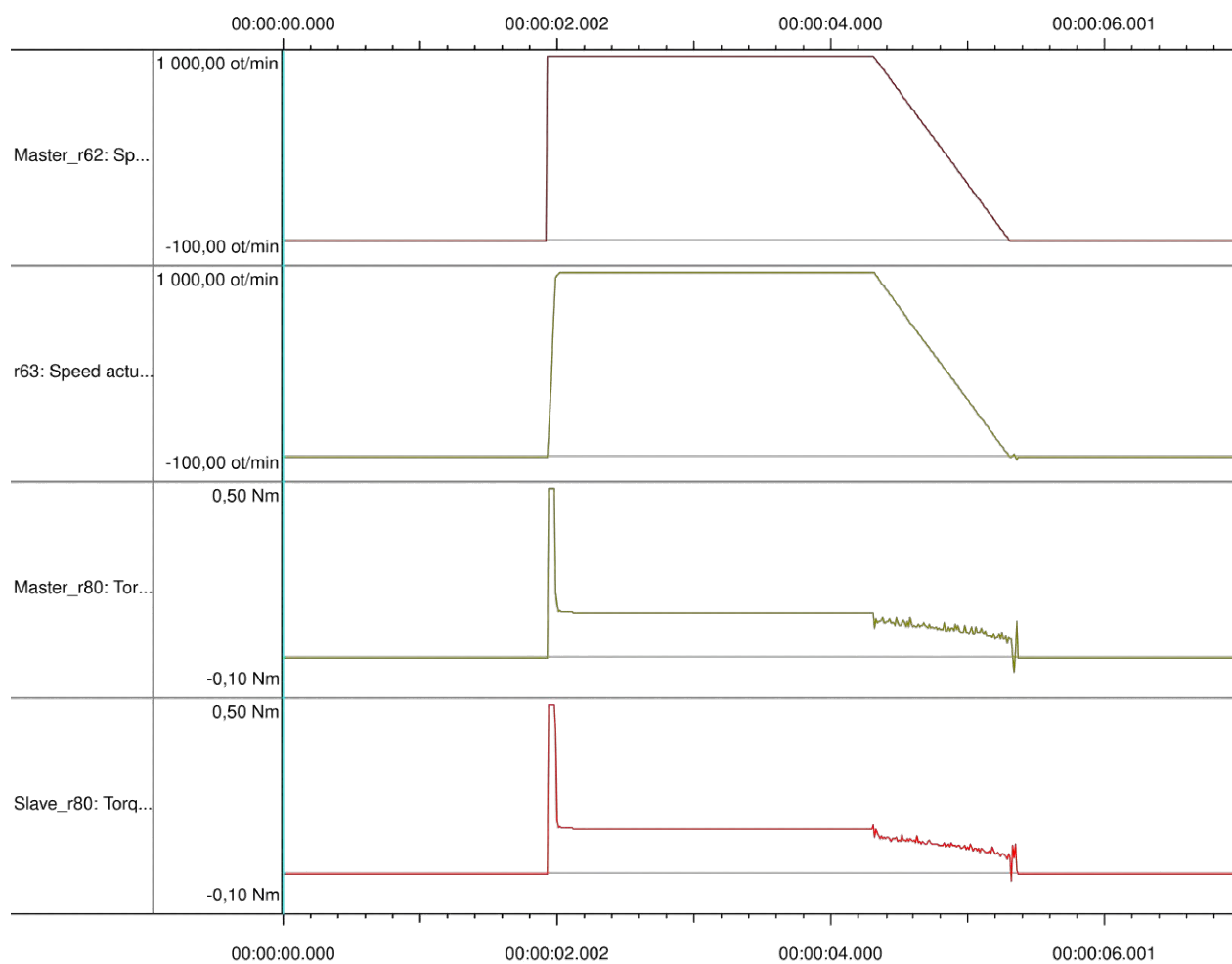
Obrázek C.11: S120 - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF1 a přechod do OFF3



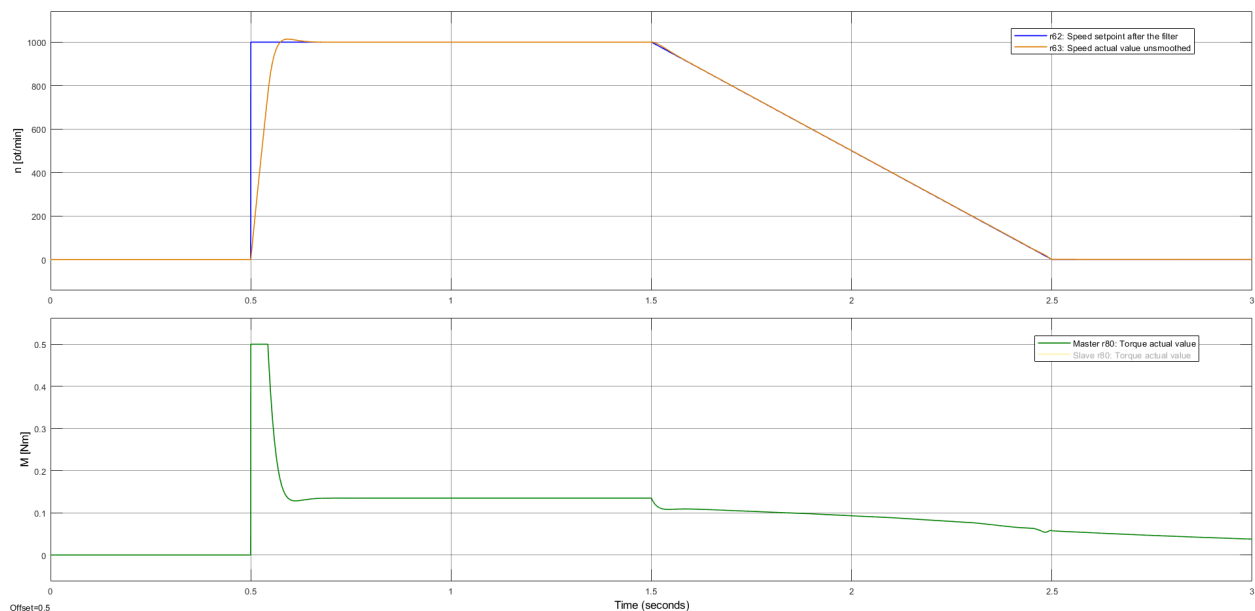
Obrázek C.12: WinMOD - zapnutí signálem ON/OFF1, vypnutí ON/OFF1 a přechod do OFF3



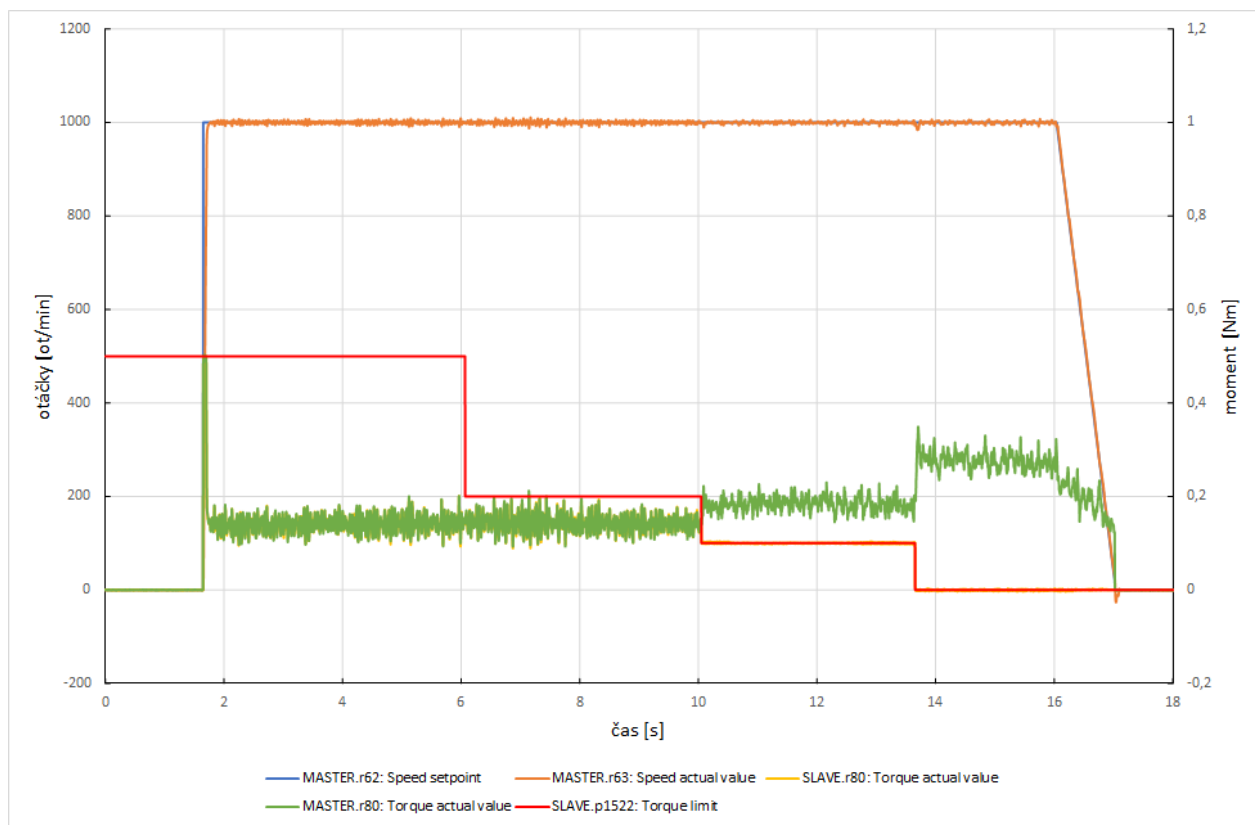
Obrázek C.13: S120 - Rozběh, doběh a zabrzdění naprázdno



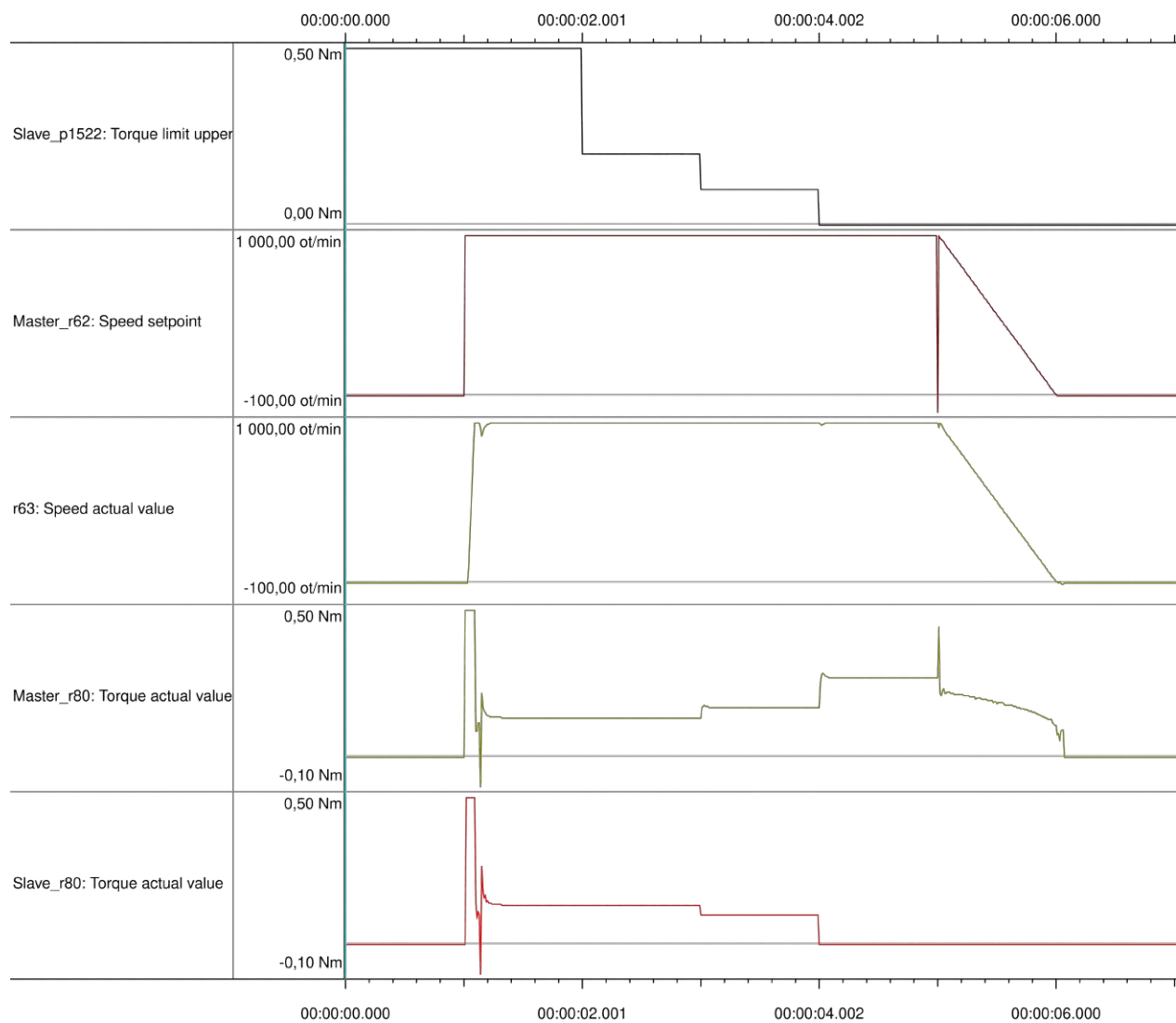
Obrázek C.14: WinMOD - Rozběh, doběh a zabrzdění naprázdno



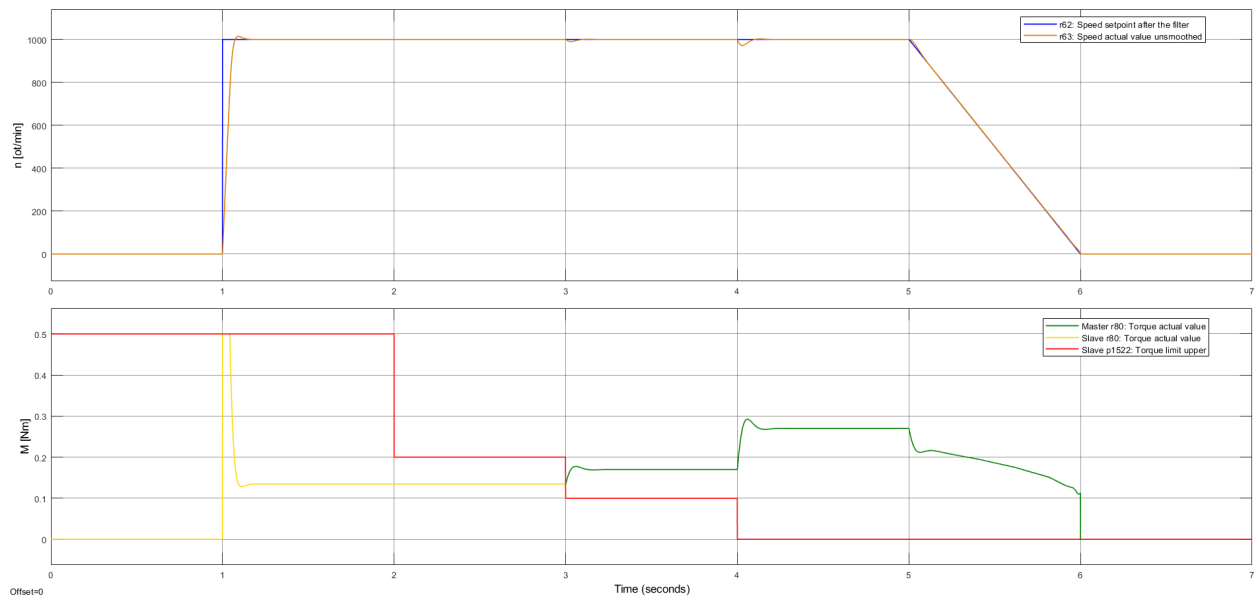
Obrázek C.15: Simulink - Rozběh, doběh a zabrzdění naprázdno



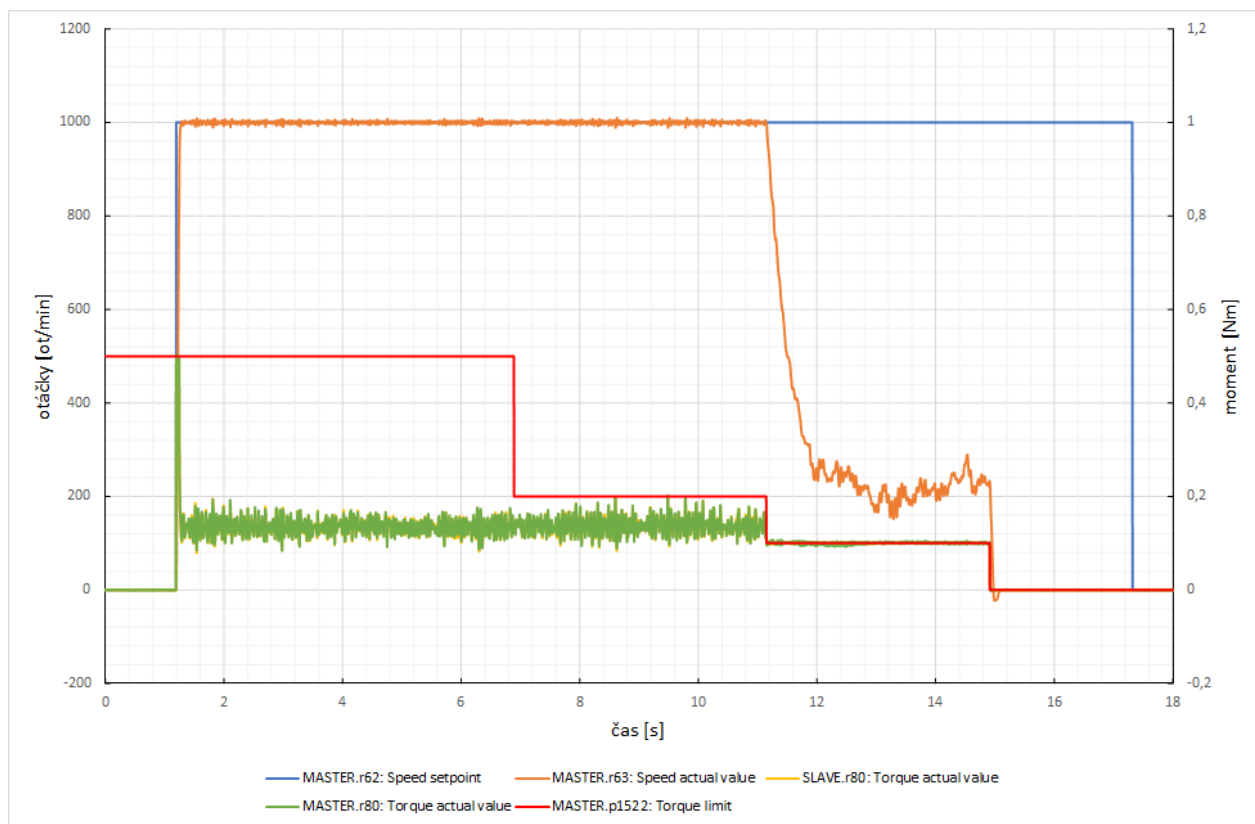
Obrázek C.16: S120 - Rozběh a postupný pokles momentového limitu pohonu Slave



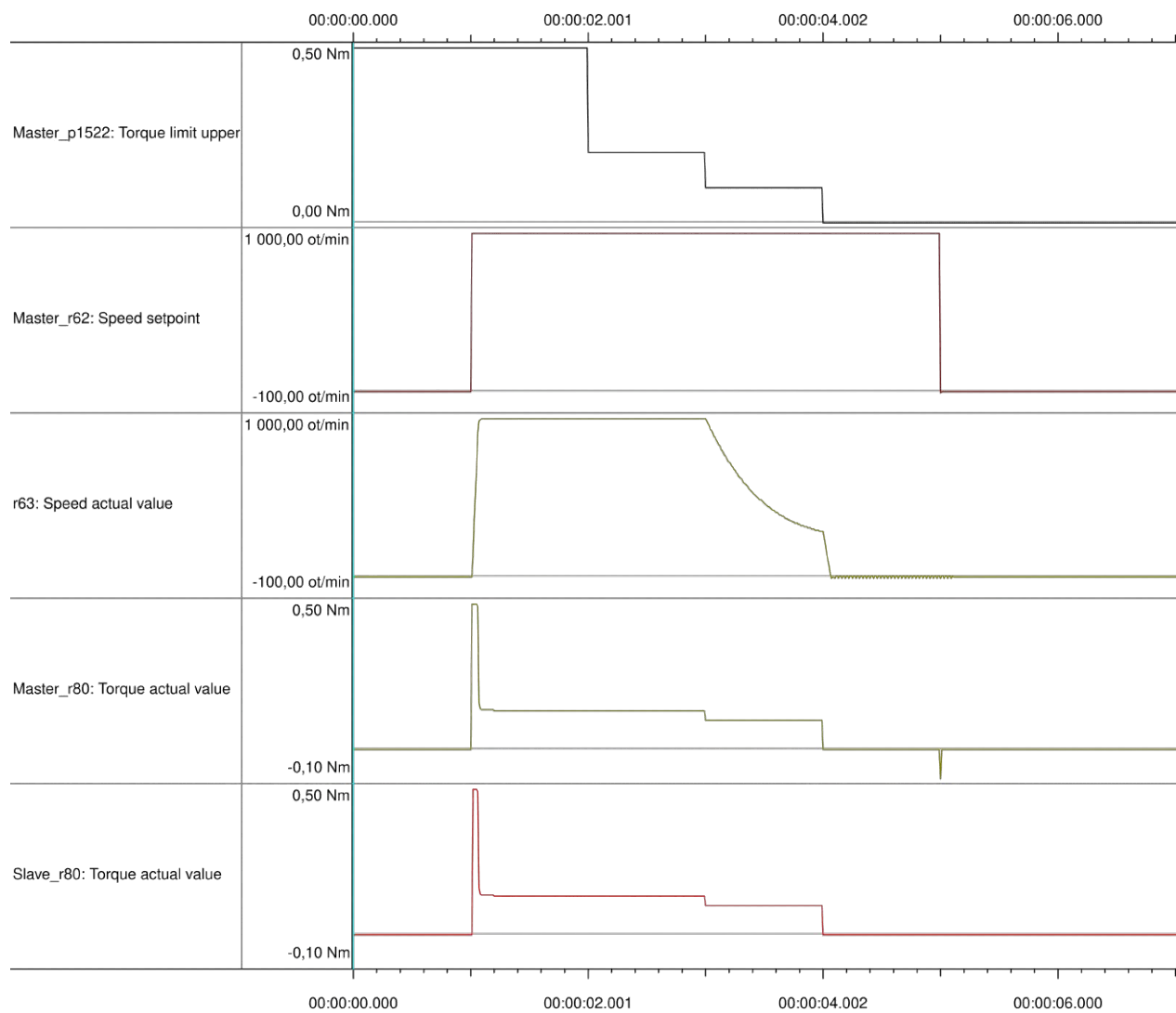
Obrázek C.17: WinMOD - Rozběh a postupný pokles momentového limitu pohonu Slave



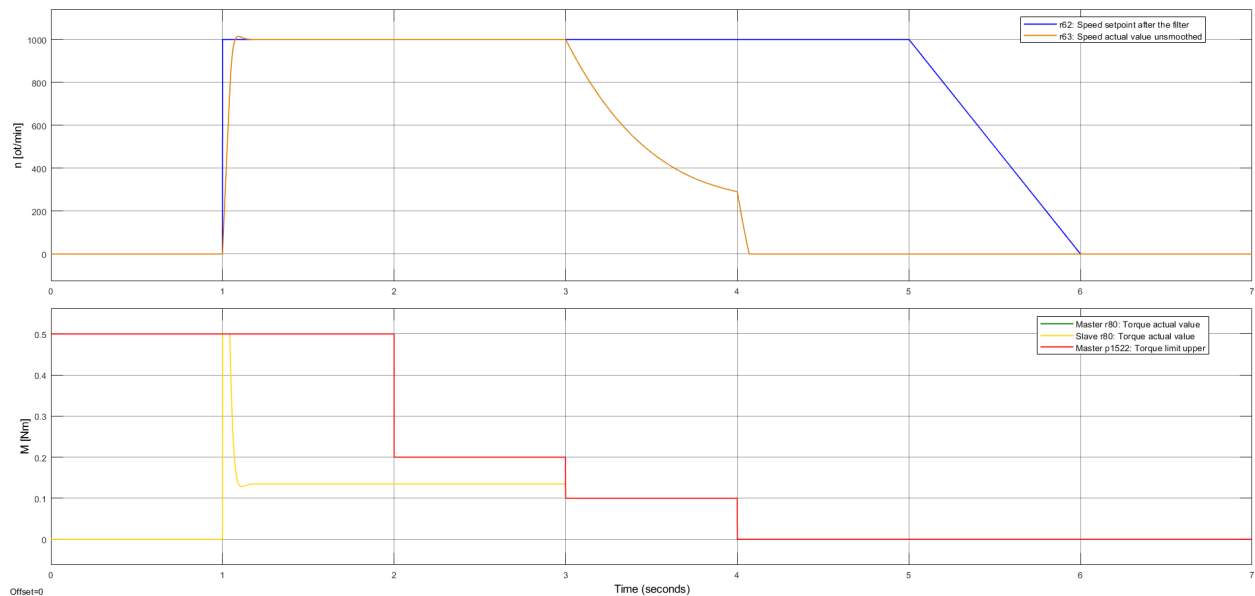
Obrázek C.18: Simulink - Rozběh a postupný pokles momentového limitu pohonu Slave



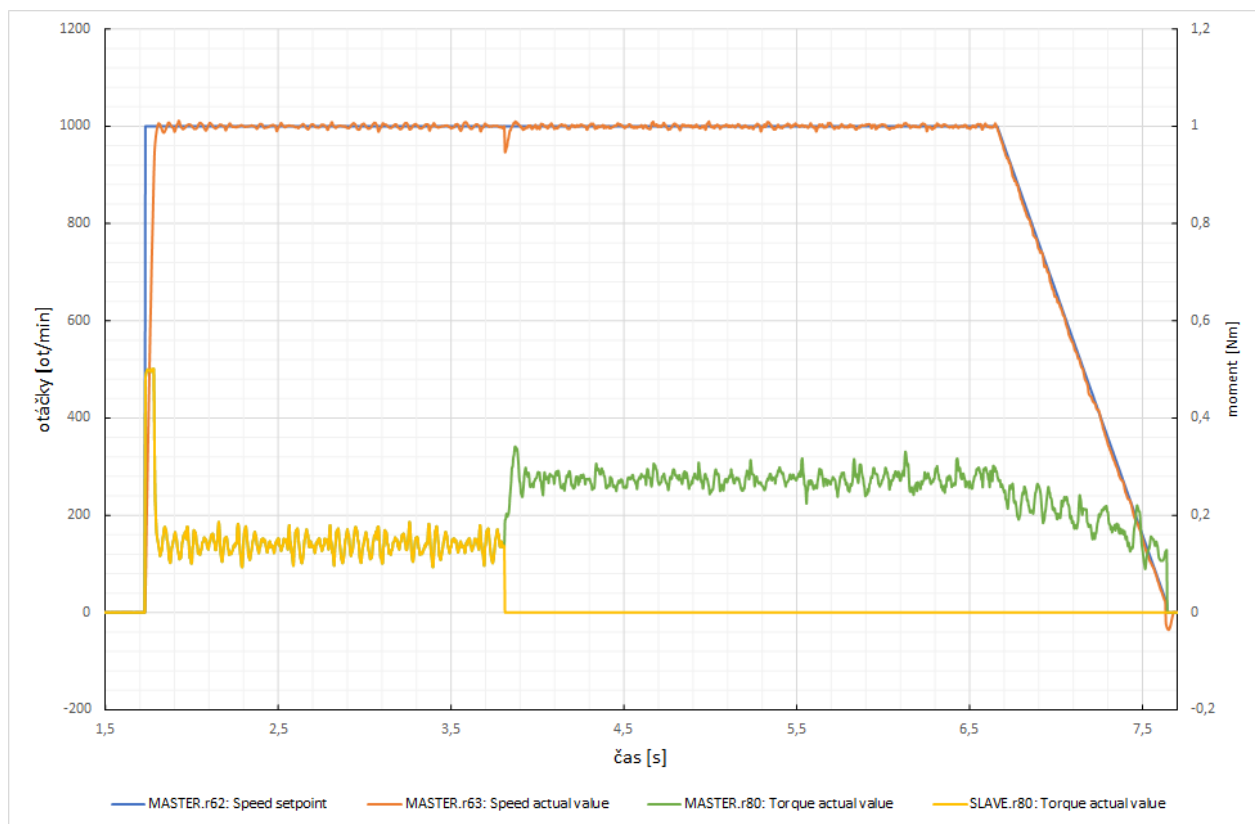
Obrázek C.19: S120 - Rozběh a postupný pokles momentového limitu pohonu Master



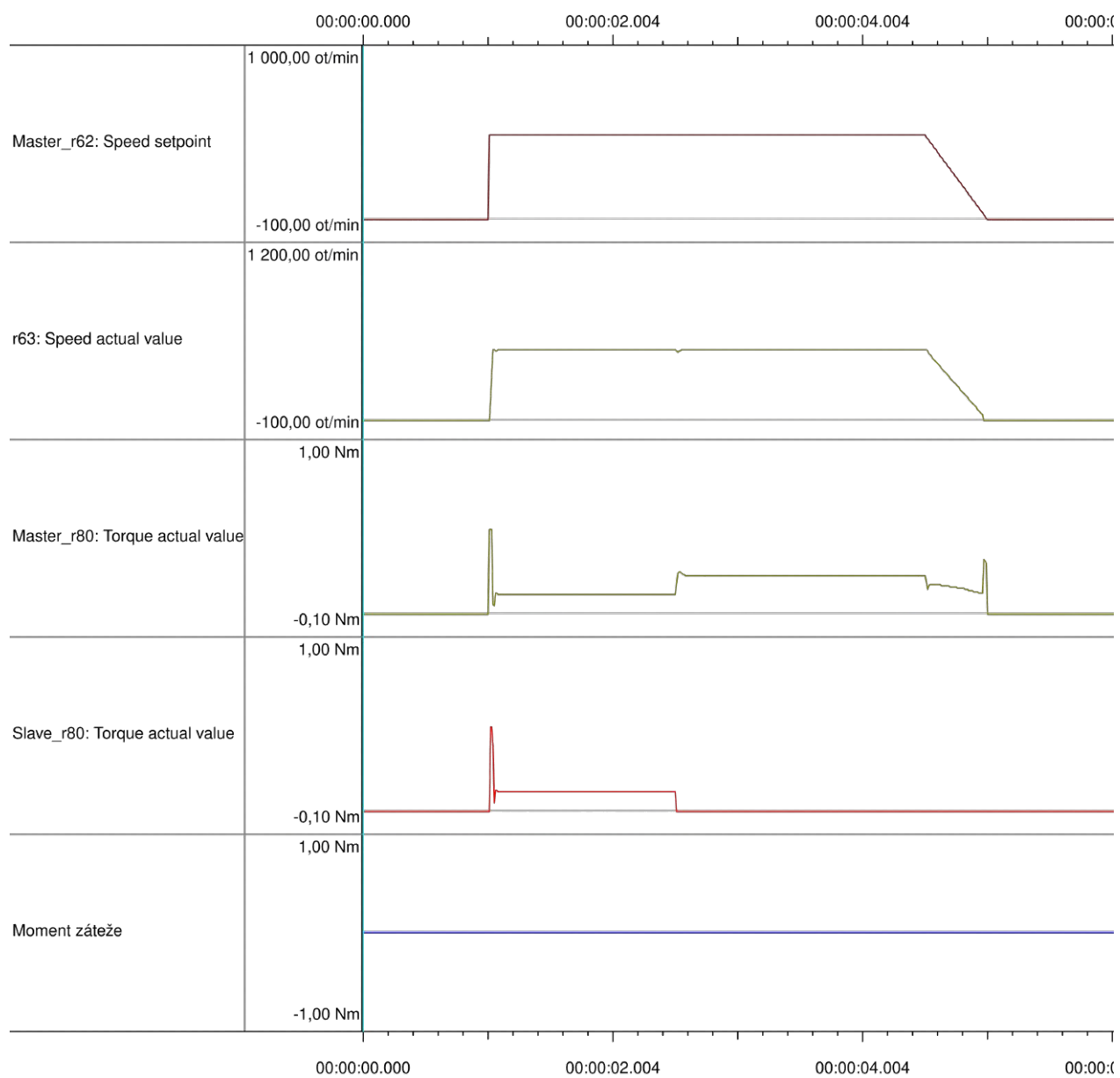
Obrázek C.20: WinMOD - Rozběh a postupný pokles momentového limitu pohonu Master



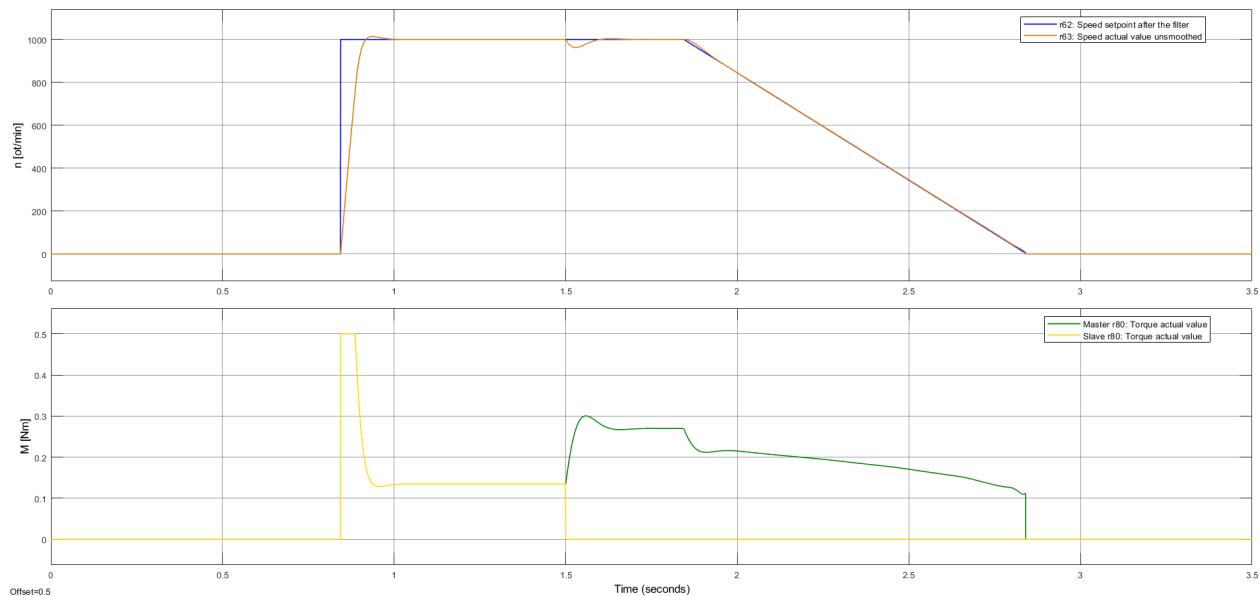
Obrázek C.21: Simulink - Rozběh a postupný pokles momentového limitu pohonu Master



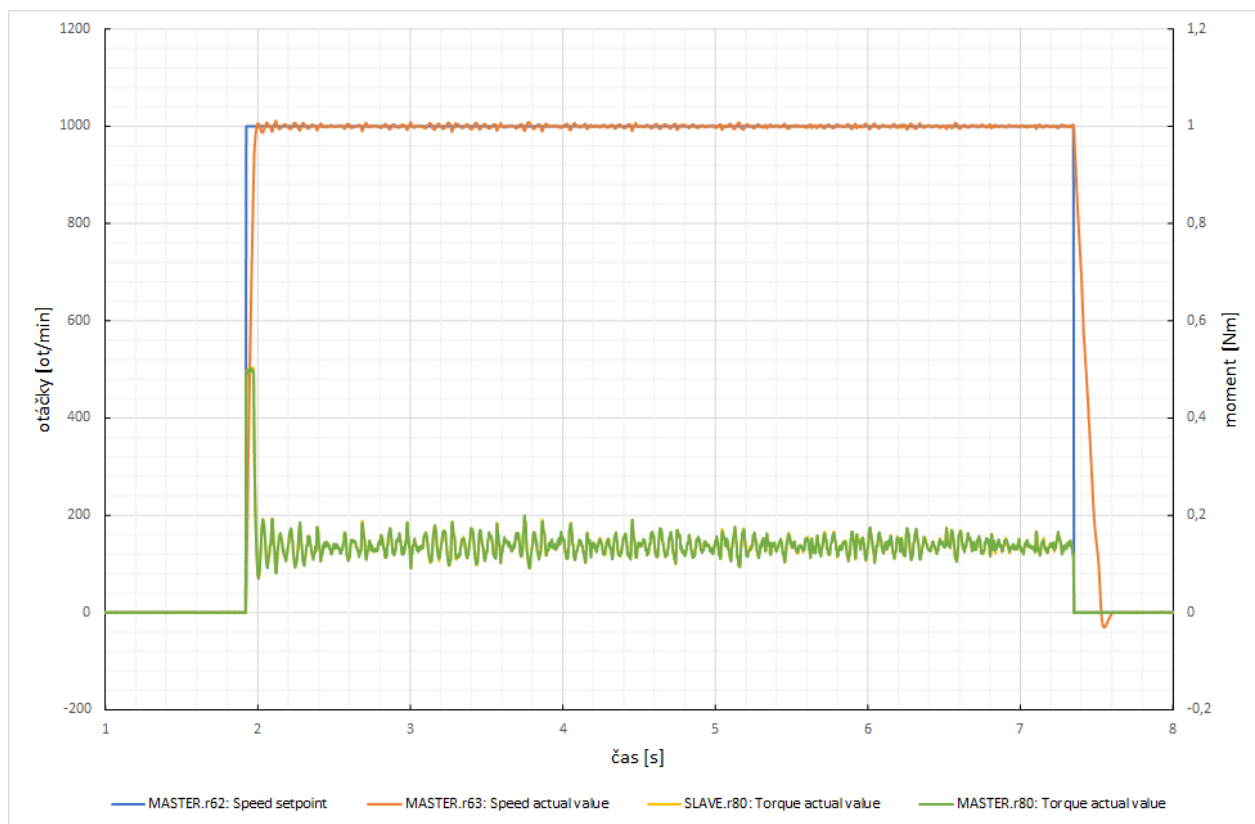
Obrázek C.22: S120 - Chyba pohonu Slave



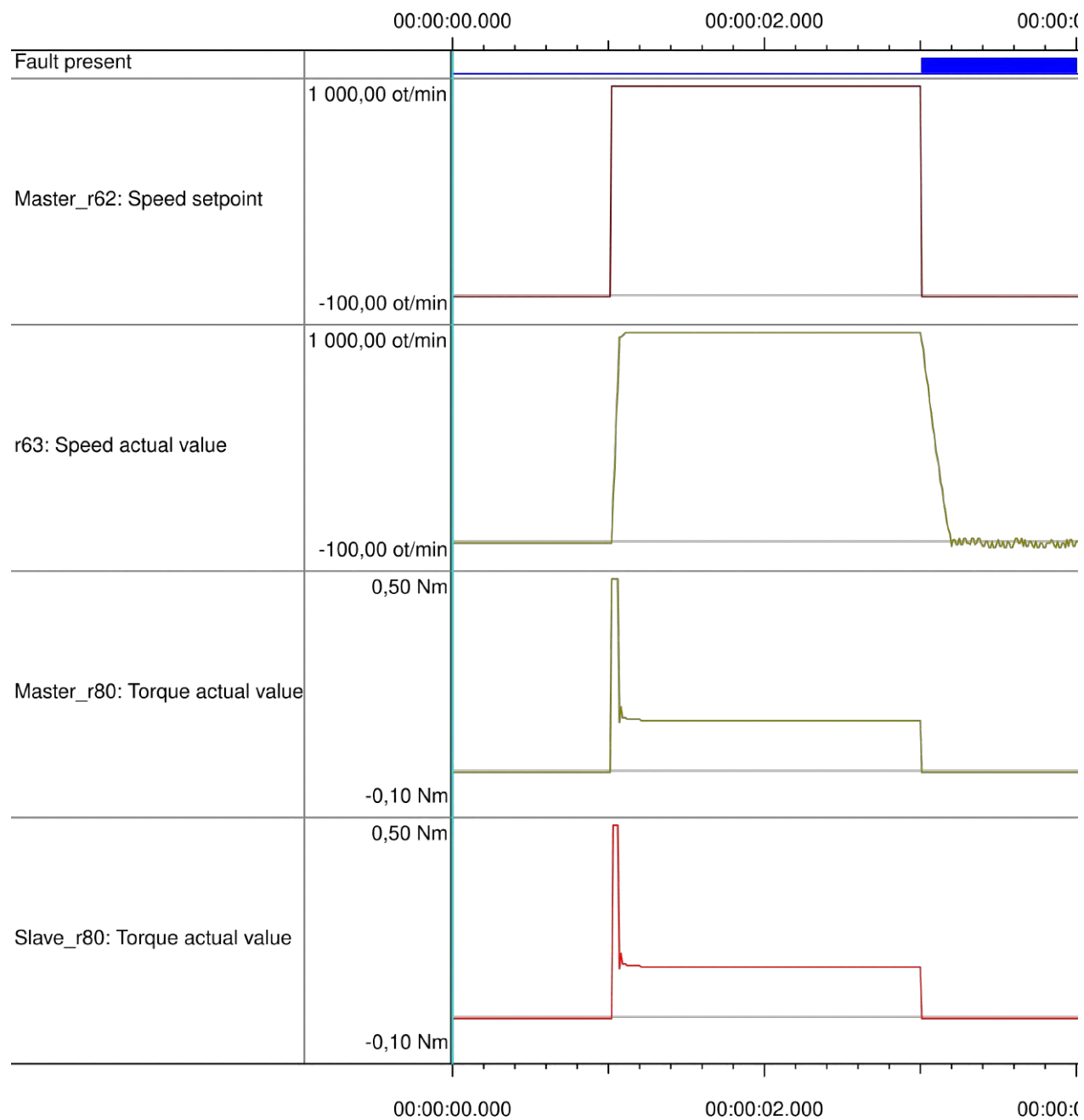
Obrázek C.23: WinMOD - Chyba pohonu Slave



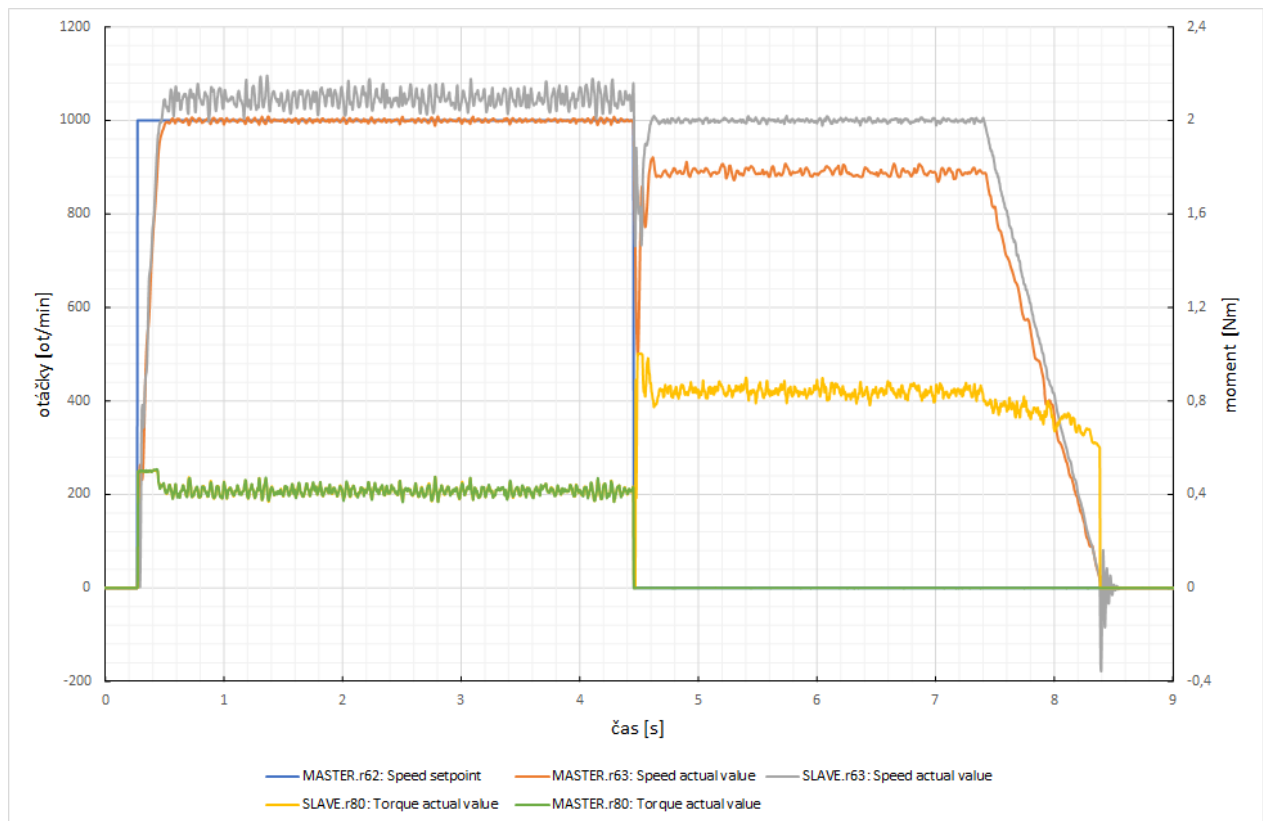
Obrázek C.24: Simulink - Chyba pohonu Slave



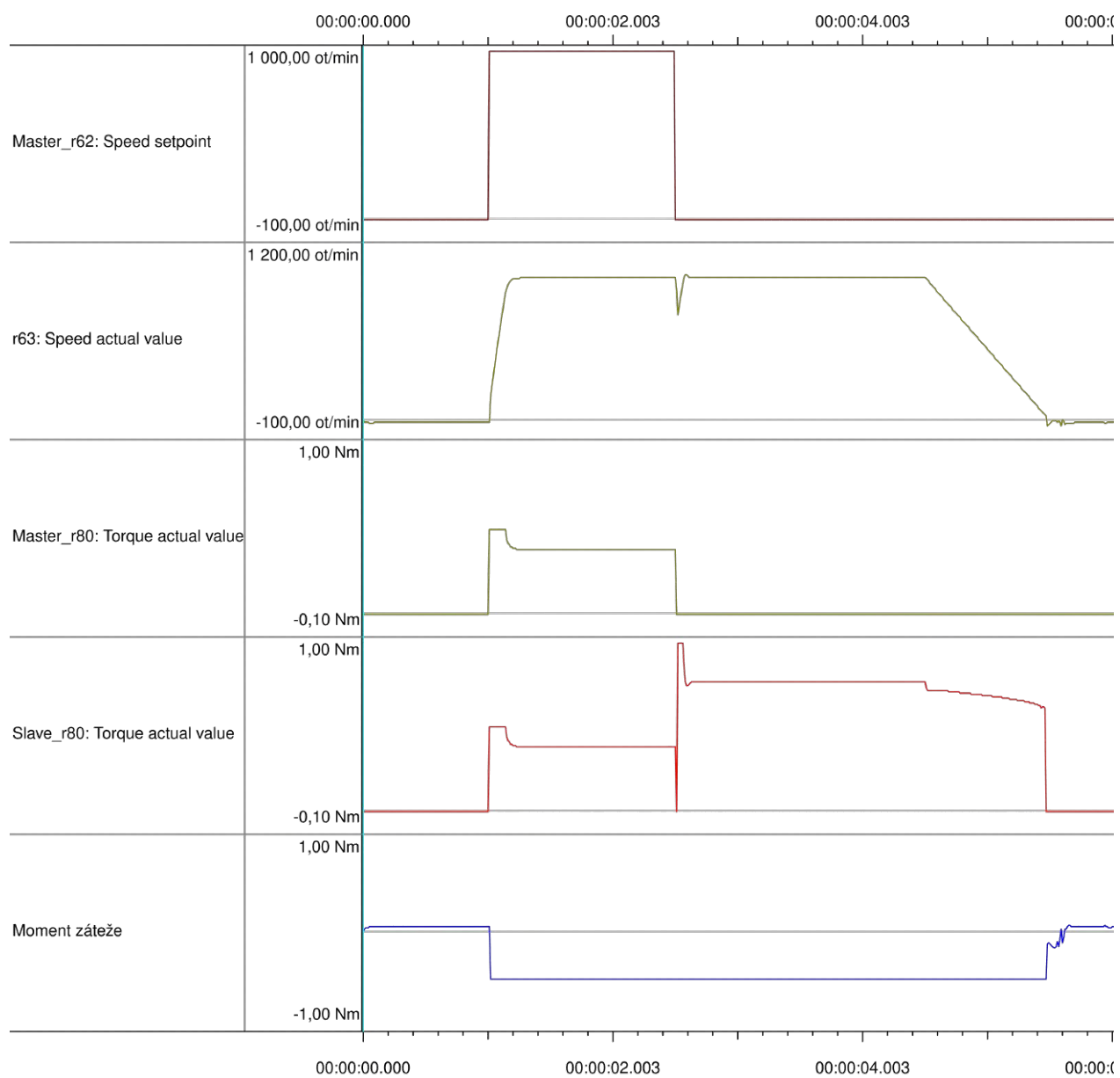
Obrázek C.25: S120 - Chyba pohonu Master i Slave



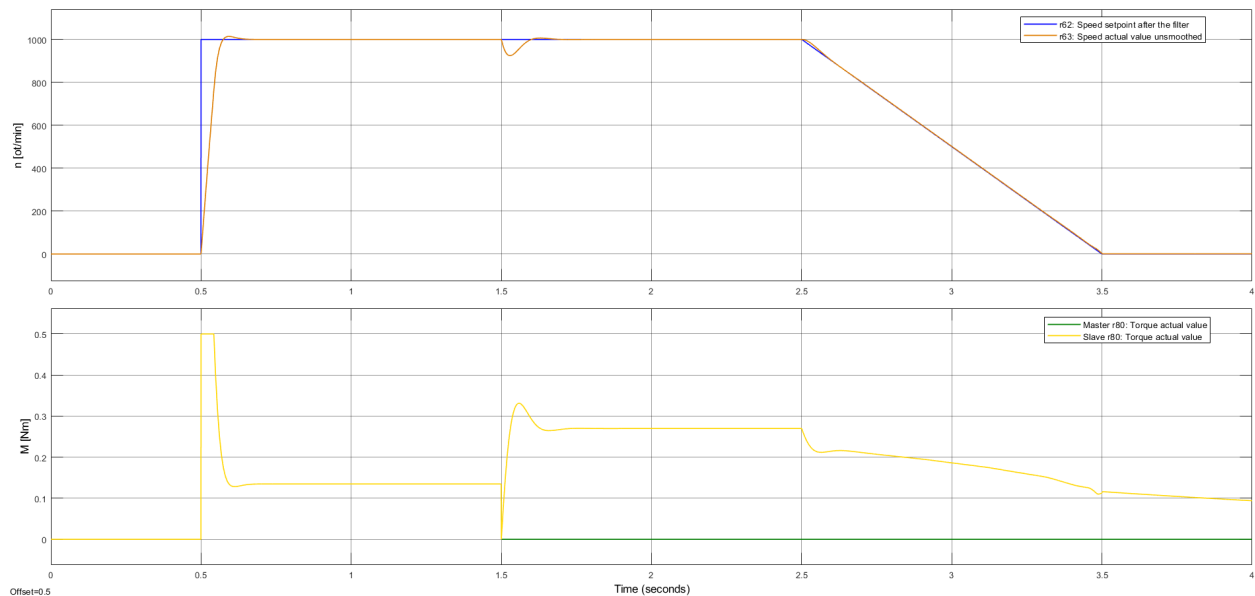
Obrázek C.26: WinMOD - Chyba pohonu Master i Slave



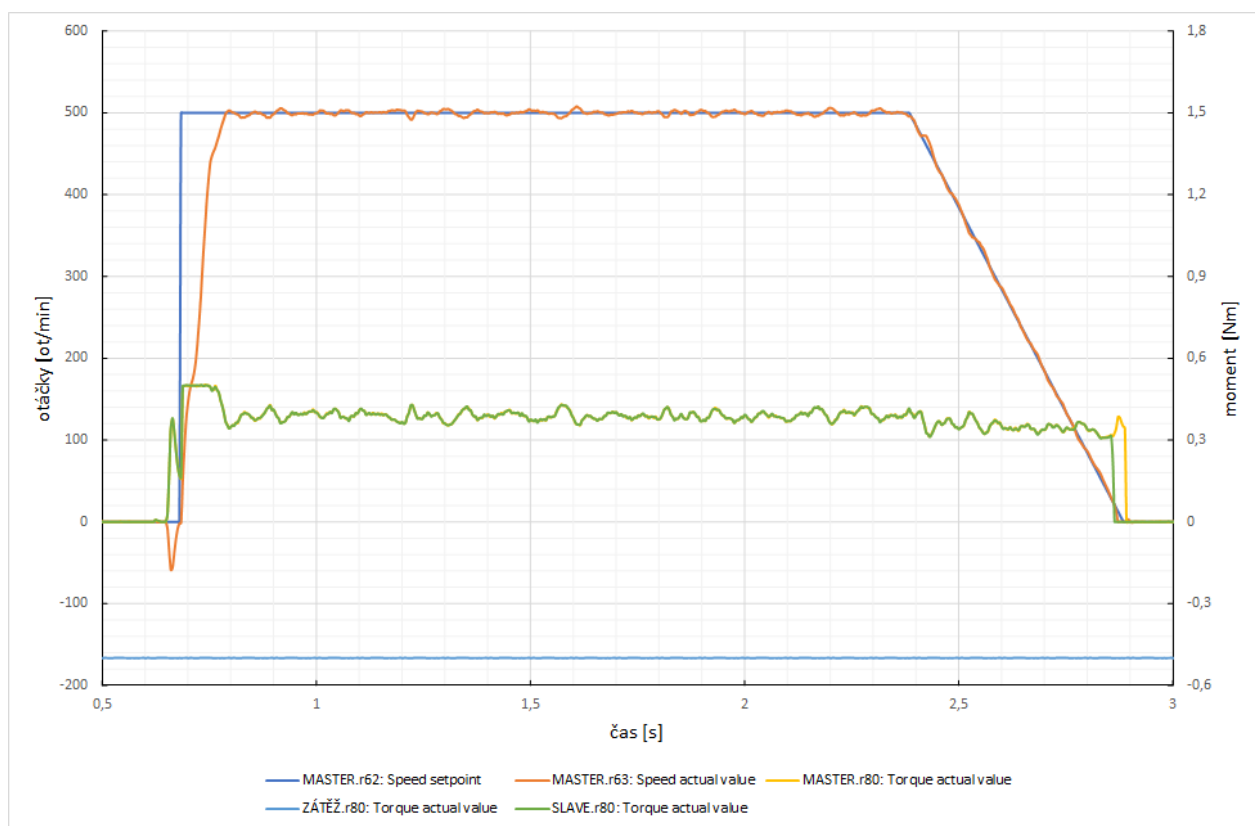
Obrázek C.27: S120 - Chyba pohonu Master, Slave se stává Mastrem



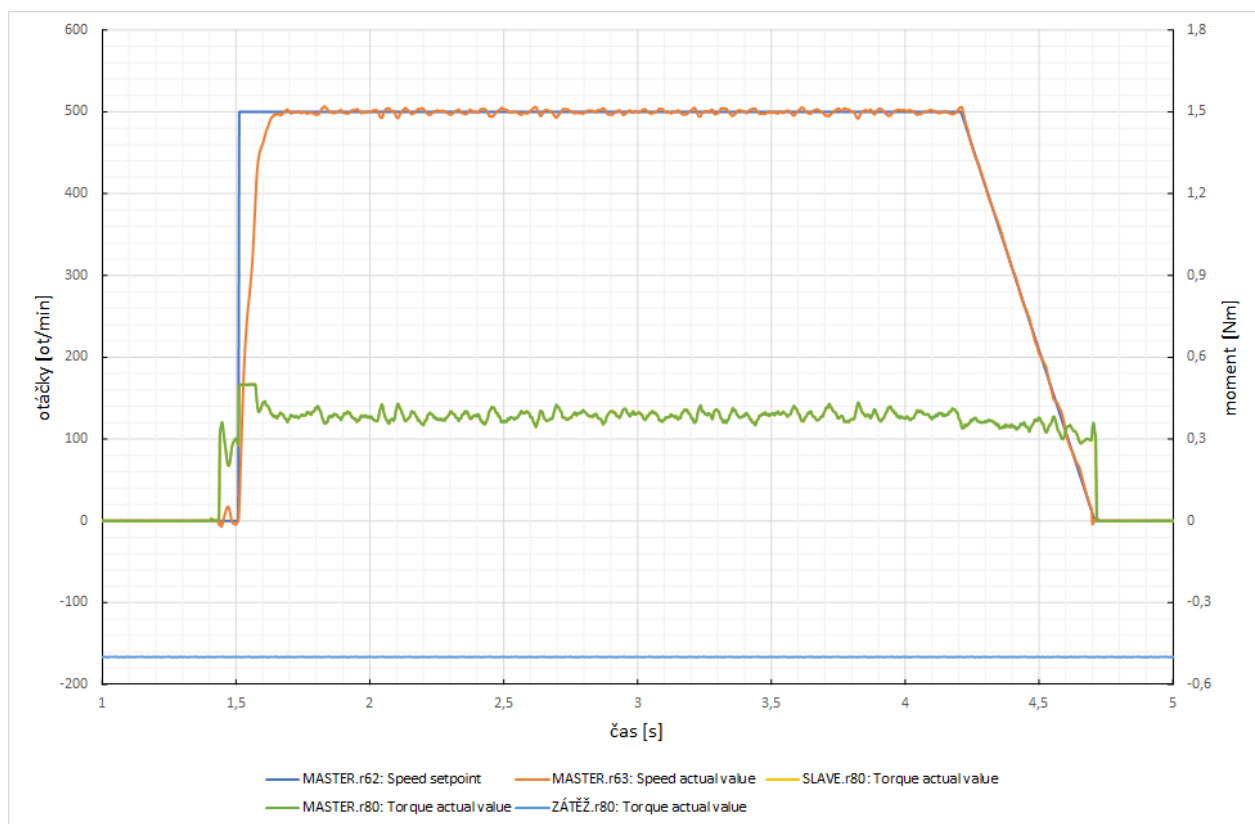
Obrázek C.28: WinMOD - Chyba pohonu Master, Slave se stává Mastrem



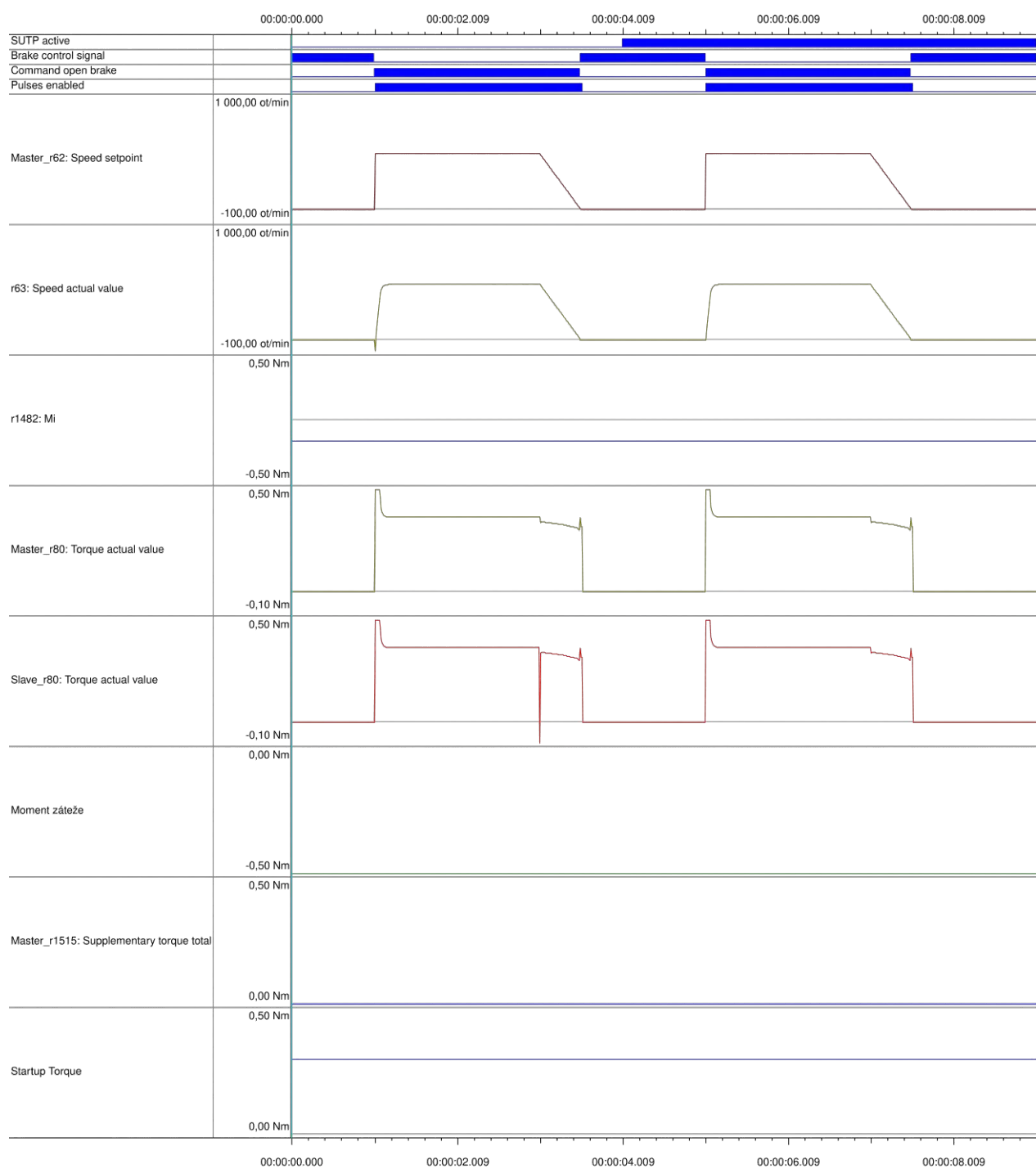
Obrázek C.29: Simulink - Chyba pohonu Master, Slave se stává Mastrem



Obrázek C.30: S120 - Rozběh a doběh s aktivní zátěží bez výtahové brzdy (SUTP)



Obrázek C.31: S120 - Rozběh a doběh s aktivní zátěží a výtahovou brzdou (SUTP aktivní)



Obrázek C.32: WinMOD - Rozběh a doběh s aktivní zátěží bez výtahové brzdy (SUTP), při zabrzdění zápis momentu a následný rozjezd s aktivní výtahovou brzdou